

Masterarbeit
Leonore Gölfert

Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende

Erstprüfer : Prof. Uwe Plank-Wiedenbeck

Zweitprüfer : Dipl.-Ing. Andreas Griebach

Betreuer : Dipl.-Ing. Andreas Griebach

: Dipl.-Ing. Tilo Schuhmann

Matrikelnummer: 110 546

Abgabetermin : 01. November 2016

Abstract

No energy transition without a switch in transport policy

To estimate the impact of total traffic on the so-called energy revolution three different scenarios have been explored. Based on European and German emission and energy consumption a model performed sensitivity simulations of the development for road, ship, rail and aircraft. The aim of this thesis is to answer the question which influence a change in transport policy can have to a successful energy revolution. The thesis shows the huge impact of transport. In particular, the combination of different actions leads to a reduction of energy consumption and carbon dioxide emissions. A reduction of the proportion of petrol or diesel vehicles in motorised private transport is necessary. Also, in the area of freight traffic, especially air, great changes take place. A modal shift from road to rail makes ecological sense. Furthermore, the studies show that the Federal Government has to do much more than they are actually doing to reach their own climate goals by the year 2050th.

By means of a literature review various topics were attended in order to create a substantiated data base. In the present work, four thematic priorities were examined.

Firstly, all possibilities of energy generation, energy sources and different types of drive are presented. Secondly, environmental and transport policies are represented in Europe and Germany. However, only the last five years are examined more closely.

The third focus is the development of scenarios and the investigation of these. Using Excel and VBA a form has been programmed, which simplifies the investigations. A total of three scenarios were examined. The first scenario remains largely in the current circumstances. It examines the future impact if the current possibilities would stagnate. The second scenario examines the best case. It answers the question which maximum stake a transport revolution in the energy revolution can have under real conditions. The third scenario examines the impact of the policy objectives. The policy has defined specific targets for Europe and Germany. The investigations show what measures are needed to achieve the German objectives. Finally, the above thesis is discussed. Overall it can be said that the transport sector has a major impact.

In conclusion it can be stated that the goals are difficult to achieve. However, they are within the realm of possibility. With appropriate focussing on the policy a significant reduction in emissions and energy consumption in the transport sector can be achieved by 2050. Thus a change in transport policies has a major impact on a successful energy revolution.

Autorenreferat

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wird die These „Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende“ diskutiert. Insbesondere wird die Frage beantwortet welche Stellschrauben Einfluss auf die ambitionierten Klimaziele der Bundesregierung nehmen können.

Das Ergebnis ist, dass es verschiedene Hebel im Verkehrssektor gibt mit Hilfe derer die Energiewende realisiert werden kann. Insbesondere ein nachhaltigerer MIV und Güterverkehr hätten enorme Auswirkungen, da der Verkehrsträger Straße den Löwenanteil an Energie verbraucht und CO₂ emittiert. Auch das Potenzial des Luftverkehrs ist im Hinblick auf die Emissionsziele enorm. Der Verkehr auf der Schiene ist bereits heute, im Vergleich zur den anderen Verkehrsträgern, umweltfreundlich. Eine Verlagerung von der Straße auf die Schiene ist aus ökologischer Sicht sinnvoll. Zu beachten ist jedoch, dass sich die Überlegungen auf Energie und Emissionen beschränken und die nötige Anpassung der Infrastruktur nicht berücksichtigt wird.

Es wurden insgesamt vier Schwerpunkte bearbeitet um eine fundierte Diskussion garantieren zu können. Zu Beginn werden die verschiedenen Möglichkeiten der Energiegewinnung dargestellt. Dabei werden insbesondere Energie aus regenerativen Energien und die verschiedenen Antriebsmöglichkeiten im Verkehrssektor berücksichtigt. Der zweite Schwerpunkt ist die Auseinandersetzung mit der Verkehrspolitik und Umweltpolitik der EU und Deutschlands. Berücksichtigt wurden im Rahmen dieser Arbeit lediglich die Entwicklungen der letzten fünf Jahre. Anschließend werden auf Grundlage der Recherche Ergebnisse mögliche Szenarien abgeleitet. Mit Hinblick auf die vielen Eingangsparameter wurde dazu ein Formular mittels VBA Programmierung erstellt. Dieses dient als Grundlage zur Bewertung der verschiedenen Szenarien. Insgesamt wurden drei Szenarien untersucht. Das erste Szenario behält weitestgehend die momentanen Gegebenheiten bei. Es untersucht die Auswirkungen, wenn beispielsweise der Modal Split sowie die technischen Möglichkeiten stagnieren würden. Das zweite Szenario untersucht den besten Fall. Es beantwortet damit die Frage welchen maximalen Anteil die Verkehrswende bzw. der Verkehrssektor an der Energiewende haben kann. Das dritte Szenario untersucht die Auswirkungen der politischen Zielvorgaben. Die Politik hat sowohl europaweit als auch für Deutschland konkrete Zielmarken definiert. Aber ist es möglich mit Hilfe dieser die nötigen Reduktionen zu erreichen?

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken die mir bei der Entstehung der vorliegenden Arbeit geholfen haben.

Insbesondere danke ich...

...meinen Betreuern Andreas Griebach und Tilo Schuhmann für die intensive und gute Betreuung. Außerdem standen sie mir bei Fragen immer tatkräftig und voller Ideen zu Seite.

...der Eco Rail Innovation und allen damit verbundenen Partnern für die Möglichkeit meine Masterarbeit diesem spannenden Thema widmen zu können.

...meinen Eltern für die zeitintensive Unterstützung insbesondere beim Beachten der deutschen Rechtschreibung und Grammatik.

...Dennis Körting für die tatkräftige Unterstützung und den Blick auf das Einhalten des Terminkalenders.

...Maximilian Gümpel für die Unterstützung, die Ideen und den anderen Blickwinkel.

...Marcella Fernanda Casanova Dominguèz für die Abwechslung und den frischen Wind.

Vielen herzlichen Dank!

Masterarbeit

Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende

eingereicht durch B.Sc. Leonore Gölfert
Matrikel-Nummer: 110546

Reg.-Nr.: UIM/2016/13

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. U. Plank-Wiedenbeck

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. A. Gießbach

externe Betreuer: Dipl.-Ing. Tilo Schumann
(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig)

Ausgabetermin: 01.07.2016

Abgabetermin: 01.11.2016



Prof. Dr. G. Morgenthal

Vorsitzender des Prüfungsausschusses

**Aufgabenstellung der Masterarbeit für Frau B.Sc. Leonore Gölfert zum Thema:
Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende**

Ziel- und Problemstellung:

Eine entscheidende Rolle für das Erreichen der ambitionierten Klimaziele und der damit verbundenen Energiewende kann der Schienenverkehr einnehmen. Vor dem Hintergrund, dass rund 20 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland durch den Verkehrssektor generiert werden und der Modal-Split-Anteil der Schiene im Personen- wie Güterverkehr lediglich bei etwa 15 Prozent liegt, wird schnell deutlich, dass hier ein entscheidender Hebel zur Erreichung der Klimaziele existiert.

Ziel der Masterarbeit ist es, verschiedene Teilaspekte des Themenfeldes umfassend zu bearbeiten und den aktuellen Stand in der Wissenschaft sowie aktuelle statistische Informationen zu ermitteln.

Die Aufarbeitung der Analyseergebnisse soll so erfolgen, dass sie

- a) für weitere Untersuchungen genutzt werden können und
- b) die These untermauern oder widerlegen, dass eine Verkehrswende für eine erfolgreiche Energiewende von entscheidender Bedeutung ist.

Thematische Abgrenzung, Umfang und Aufgabenstellung der Masterarbeit:

Im Einzelnen wird die Bearbeitung folgender Schwerpunkte gefordert

1. Schwerpunkt:

Zusammenstellung des aktuellen Forschungs- und Wissensstands zu den CO₂-Emissionen und Energieverbräuchen in Europa, insbesondere in Deutschland. Besondere Berücksichtigung soll hierbei der Verkehrssektor finden.

2. Schwerpunkt:

Zusammenstellung der aktuellen Ziele der Umwelt- und Verkehrspolitik in Deutschland und Europa insbesondere die Beschreibung des Projektes Energiewende sowie Ableitung konkreter Handlungsfelder.

3. Schwerpunkt:

Ableitung verschiedener Verkehrsszenarien für Deutschland und ihre Effekte auf eine Verkehrs- und Energiewende. Weiterhin ist der Einfluss dieser Zukunftsszenarien zu analysieren. „Was wäre wenn“ – Betrachtungen bei Effizienzsteigerung und Änderungen am Modal Split bei unterschiedlichen Verkehren.

4. Schwerpunkt:

Im letzten Schritt soll die These „Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende“ bewertet werden. Dazu sind Handlungsempfehlungen und Argumente für oder gegen die genannte These abzuleiten. Der Focus liegt dabei auf der Betrachtung des Schienenverkehrs.

Während der Bearbeitung sind mehrere Rücksprachen mit den Prüfern erforderlich und erwünscht.

Bei der Anfertigung der Studienarbeit ist das „Merkblatt für die Anfertigung von studentischen Arbeiten“ der Professur Verkehrssystemplanung zu beachten.

Bei der Arbeit handelt es sich um eine studentische Arbeit, die eine entsprechende Fachplanung bzw. gutachterliche Stellungnahme nicht ersetzen kann.



Prof. Dr.-Ing. U. Plank-Wiedenbeck
Erstprüfer

Thesen

I

Die Umweltpolitik ist sehr träge. Die Anpassung an aktuelle Entwicklungen erfolgt nur innerhalb langer Zeiträume.

II

Der Hebel mit der größten Wirkung auf den Energieaufwands und der CO₂-Emission ist die Umstellung des MIV auf einen Elektroantrieb.

III

Langfristig ist zu erwarten, dass der Verkehrssektor seinen Primärenergiebedarf ausschließlich durch Strom decken kann.

IV

Die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung können bis zum Jahr 2050 nicht erreicht werden.

V

Nur durch die Kombination vieler kleinerer Maßnahmen kann die notwendige Reduktion des Energieaufwands und der CO₂-Emission erreicht werden.

VI

Der Schienenverkehr ist der Hauptakteur bei einer erfolgreichen Verkehrswende.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Begriffe	2
3	Energieerzeugung	4
3.1	Energie aus fossilen Energiequellen und Kernenergie	5
3.1.1	Kohle	5
3.1.2	Erdöl	6
3.1.3	Erdgas	6
3.1.4	CCS-Technik	6
3.1.5	Kernenergie	7
3.2	Energie aus regenerative Energiequellen	7
3.2.1	Windenergieanlagen	7
3.2.2	Photovoltaik	8
3.2.3	Solarthermische Kraftwerke	8
3.2.4	Wasserkraftwerke	9
3.2.5	Gezeitenkraftwerke	9
3.2.6	Geothermiekraftwerke	9
3.2.7	Heizkraftwerk mit Biomasse	10
3.3	Antriebsarten im Verkehrssektor	10
3.3.1	Biomasse	10
3.3.2	Elektroantrieb	12
3.3.3	Wasserstoffantrieb	12
3.3.4	Hybridantriebe	13
4	Energieaufwand und CO₂-Emission	15
4.1	Status Energieaufwand und CO ₂ -Emission in Europa	16
4.1.1	Verkehr	16
4.1.2	Luft	17
4.1.3	weitere Sektoren	17
4.2	Status Energieaufwand und CO ₂ -Emission in Deutschland	19
4.2.1	Verkehr	19
4.2.2	Haushalte, Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	24
4.3	Tendenzen	26
4.3.1	Allgemeine Entwicklung	26
4.3.2	Elektrifizierung	28
4.3.3	Erneuerbarer Energien und alternative Kraftstoffe	29
4.3.4	Effizienzsteigerung	30
4.3.5	Fazit	30

5	Aktuelle Umwelt- und Verkehrspolitik	32
5.1	Umweltpolitik	32
5.1.1	Europa	32
5.1.2	Deutschland	35
5.1.3	Energiewende	38
5.2	Verkehrspolitik	40
5.2.1	Europa	40
5.2.2	Deutschland	43
5.3	Handlungsfelder	49
6	Zukunftsszenarien	51
6.1	Randbedingungen	51
6.2	Rechenmodell	53
6.2.1	Visual Basics for Application (VBA)	53
6.2.2	Verwendetes Modell	54
6.3	Entwicklung der Szenarien	58
6.3.1	Trendszenario	59
6.3.2	Best-Case-Szenario	60
6.3.3	Politisches Szenario	61
6.4	Bewertung der Szenarien	62
6.4.1	Ergebnis des Trendszenario	62
6.4.2	Ergebnis des Best-Case Szenario	62
6.4.3	Ergebnis des Politisches Szenario	62
6.4.4	Grenzen des verwendeten Modells	66
7	Diskussion der These	67
8	Zusammenfassung und Ausblick	69
	Anhang	77

Abbildungsverzeichnis

3.1	Kraftwerke nach Prozessart nach KONSTANTIN (2013) [eigene Darstellung] . . .	4
3.2	Strommix in Deutschland 2015 [AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (2016)]	5
3.3	Antriebssystem, Energieträger, -speicher, und -umwandlungsanlagen [STAN (2015) S. 38]	11
3.4	Matrix verschiedene Antriebsarten nach STERNER & STADLER (2014) S. 154 [eigene Darstellung]	14
4.1	CO ₂ -Emission [t] je Einwohner für 2013 [KLEINKNECHT (2015) S. 60]	15
4.2	Entwicklung Endenergieverbrauch, EU-28 [%][EUROSTAT (2016)]	16
4.3	Entwicklung CO ₂ -Emissionen in der EU nach Quellkategorien [UMWELTBUNDESAMT (2014)]	18
4.4	Endenergieverbrauch nach Sektoren nach UMWELTBUNDESAMT (2015b) [eigene Darstellung]	19
4.5	Endenergieverbrauch des Verkehrs [UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 110] . . .	20
4.6	Spezifischer Energiebedarf 2012 [VDV (2014) S. 10]	21
4.7	Spezifische Kohlenstoffdioxidemission 2012 [VDV (2014) S. 10]	21
4.8	Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen Straßenverkehr Deutschland 1990-2011 [IFEU (2012) S. 42]	22
4.9	Spezifische Emissionen deutscher Flughäfen [BDL (2015) S. 7]	23
4.10	Zusammensetzung des Endenergieverbrauch der einzelnen Sektoren 2014 nach UMWELTBUNDESAMT (2015b)[eigene Darstellung]	26
5.1	Ziele europäische Umweltpolitik [EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014a) S. 2] . .	32
5.2	Emissionssenkungspotenzial EU [EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011b) S. 6] . .	34
5.3	10-Punkte-Energie Agenda [BMW (2016a), online]	39
6.1	Kausaldiagramm [eigene Darstellung]	53
6.2	Oberfläche Eingabeformular [eigene Darstellung]	57
6.3	Übersicht Szenarien [eigene Darstellung]	63

Tabellenverzeichnis

4.1	Spezifische Verbräuche bzw. Emissionen für die Schiene nach [VDV (2014) S. 10]	25
4.2	Emissionen weitere Sektoren 2014 nach [UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 12-18]	25
4.3	Entwicklung Transportleistung im Personenverkehr nach [BMVI (2016b) S. 57]	27
4.4	Entwicklung Transportleistung im Güterverkehr nach [BMVI (2016b) S. 56-57]	27
5.1	Ziele Energiekonzept nach [BMWI & BMU (2010) S. 5]	36
5.2	Zusammenfassung Ziele Umwelt- und Verkehrspolitik	48
5.3	Anteil und Herausforderungen Verkehrsträger an der Energiewende	50
6.1	Vor- und Nachteile VBA nach [KOFILER (1996) S. 79-80]	54
6.2	Parameter Szenarien	60
6.3	Modul Split Szenario Best-Case-Szenario	61
6.4	Beispiele für Eingangsparameter des politischen Szenarios	65

Abkürzungen

AtG	Atomgesetz
BauGB	Baugesetzbuch
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage, d.h. CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EKFG	Gesetz zur Errichtung eines Sondervermögens Energie- und Klimafonds
EnWGÄndG	Gesetz zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes
ERegG	Eisenbahnregulierungsgesetz
ETS	European Emission Trading System, d. h. EU-Emissionshandel
GG	Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz
Pkw	Personenkraftwagen

RÖE	Rohöleinheit
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VVV-Strategie	bestehend aus Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Effizienzverbesserung der Verkehrsmittel

„Every time I see an adult on a bicycle, I no longer despair for the future of the human race.“

Herbert Georg Wells, 1904

„Es gehört zum Einmaleins jeder Betriebswirtschaftslehre, dass etwas mehr verbraucht wird und nicht etwa weniger, wenn es billiger wird. Also lautet die politische Antwort: Wir müssen Ressourcen und Energie teurer machen.“

Ernst Ulrich von Weizsäcker, Mai 2010

„One of the great underlying themes of Moby-Dick, is that people ashore don't want to know about the ugly things that go on at sea. We want our comforts but we don't want to know too much about where they come from or what makes them possible. The oil spill in the gulf is a horror, but how many Americans are ready to pay more for oil or for making the public investment required to develop alternative energy? I suspect it's a question that Melville would be asking of us now.“

Andrew Delbanco, 2010

„Auch bei uns werden unbequeme Wahrheiten nicht ausgesprochen — dass es nämlich nicht nur steigende Rohstoffpreise sind, die eine Energierevolution notwendig machen, sondern das vitale Interesse, auch zukünftigen Generationen einen menschenfreundlichen Planeten zu hinterlassen. Dieses Interesse rechtfertigt massive Investitionen jetzt — in Erneuerbare, in Stromspeicher, in Verteilungsnetze.“

Hermann E. Ott, Oktober 2012¹

¹WWW.DIE-KLIMASCHUTZ-BAUSTELLE.DE (2016), online

1 Einleitung

Klimaschutz, Erderwärmung und Energiewende sind, gerade in Europa, viel diskutierte Schlagwörter. Diese Diskussionen sind nicht neu.

Bereits vor der Ölkrise im Jahr 1970 wurde die Endlichkeit der fossilen Energieträger thematisiert. Mit zunehmendem Bewusstsein für die Ursachen des Klimawandels und dem Ausstieg aus der Atomenergie rückte der Umbau der Energieversorgung in den Mittelpunkt der Debatte¹. Das Thema ist trotz zahlreicher Auseinandersetzungen in den letzten Jahren immer noch hoch aktuell. Dies zeigt ein aktuelles Beispiel. Im September 2016 sorgte der neue Bericht von Autoren des Club of Rome mit dem Titel „1 Prozent“, welcher auch klimarelevante Maßnahmen enthält, für Schlagzeilen. Bekannt geworden ist der Club of Rome Anfang der 70er Jahre durch den Bericht „Grenzen des Wachstums“, welcher eine wichtige Grundlage für die grüne Bewegung darstellte². Während „Grenzen des Wachstums“ durch die Prognose der zukünftigen Entwicklung bestimmt ist, werden in „1 Prozent“ konkrete Maßnahmen benannt. Eine der zentralen Forderungen dieses Berichts ist die Einführung einer CO₂-Steuer, um Anreize für Klimaschutz zu schaffen³.

Es stellt sich also die Frage, wie die Politik Anreize für eine „Verkehrswende“ schaffen kann, um Ergebnisse in der schon lange geführten Debatte erzielen zu können. Gerade dadurch, dass Kernfragen der Klimaschutz- und der damit verbundenen Umwelt- und Verkehrspolitik nicht erst seit kurzem diskutiert werden, ist es von Bedeutung, dass Maßnahmen ergriffen werden, die von allen Akteuren angenommen, d.h. akzeptiert und realisiert werden.

Konkrete Ziele wurden von der Politik für Europa und Deutschland bereits formuliert. Es stellt sich die Frage, welchen Anteil die einzelnen Sektoren, insbesondere der Verkehrssektor, an der Umsetzung haben können bzw. welche Auswirkung eine erfolgreiche Umsetzung hätten. Ziel der Arbeit ist es, eine fundierte Diskussion über die These „Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende“ zu ermöglichen. Der Untersuchungsschwerpunkt liegt dabei auf Deutschland und dem Verkehrssektor.

¹vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 4

²vgl. BERNAU (2016), online

³vgl. BERN (2016), online

2 Begriffe

In dieser Arbeit werden Begriffe verwendet, deren Bedeutung, sich je nach Sichtweise und wissenschaftlichem Ansatz unterscheiden. Allerdings ist für das Verständnis eine präzise Abgrenzung nötig. Aus diesem Grund wird zu Beginn die im Folgenden genutzte Semantik erläutert.

Übergreifendes

Der Terminus **Wende** impliziert, dass ein neuer Zeitabschnitt beziehungsweise eine Neuordnung im jeweiligen Bereich bevorsteht.

Unter **Energiewende** ist die Verlagerung von der Nutzung fossiler Energieträger hin zur überwiegenden Nutzung von nachhaltigen, also regenerativen, Energien zu verstehen¹.

Analog wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff **Verkehrswende** für die Entwicklung hin zu einem nachhaltigen Verkehrssystem verwendet. Sie beinhaltet die klassischen Kernpunkte der sogenannten **VVV-Strategie**: die Schaffung eines Verkehrssystems mit geringem Energiebedarf durch Verkehrsvermeidung bzw. -verlagerung und die Steigerung der Effizienz². Langfristig ist dies nur durch den Umstieg auf regenerative Energien zu realisieren.

Energie

Der Begriff **Primärenergie** umfasst alle Energiearten, die natürlich verfügbar und vom Menschen genutzt werden können. Der Primärenergiebedarf ist ein Indikator für den Ressourcenverbrauch, die wirtschaftliche Leistung, die Lebensbedingungen und den Ausstoß klimarelevanter Gase³.

Sekundärenergie entsteht aus Primärenergie durch die Umwandlung zum Verbrauch. Also beispielsweise die chemische Energie von Benzin, welches aus Öl gewonnen wird.

Endenergie ist der Anteil der Primärenergie der am Ende vom Verbraucher nutzbar ist, also nicht bei der Umwandlung verbraucht wird⁴.

Der **spezifische Primärenergieaufwand** gibt an, wie viele Kilowattstunden an Primärenergie zur Bereitstellung einer bestimmten Einheit (beispielsweise Kilowattstunde) an Endenergie benötigt werden⁵. Die Begriffe Energieaufwand und Energieverbrauch sind in der vorliegenden Arbeit äquivalent.

¹vgl. JOOS (2015) S. 7

²vgl. ADLUNGER ET AL. (2013) S. 14

³vgl. ZIESING ET AL. (2012) S. 16

⁴vgl. GOCHERMANN (2016) S. 16

⁵vgl. SCHWISTER (2010) S. 436

Unter dem Begriff **Wirkungsgrad** ist das „Verhältnis zwischen der physikalisch maximal abgebbaren Nutzleistung und der dazu eingesetzten Leistung“ zu verstehen⁶.

Politik

Der Begriff **EU-28** umfasst die 28 Mitgliedsländer der Europäischen Union seit Juli 2013⁷.

Verkehr

Verkehr lässt sich mit Hilfe von verschiedenen Parametern beschreiben. Das **Verkehrsaufkommen** beschreibt, ohne Berücksichtigung der Entfernung, die Menge an transportierter Sendungen, bewegten Personen oder Fahrzeugen. Die **Verkehrsleistung** hingegen verknüpft das Aufkommen mit der zurückgelegten Entfernung⁸.

Das Einbeziehen der **Kraftstoffvorketten** bedeutet, dass bei der Emissionsberechnung auch die Emissionen berücksichtigt werden, welche bei der Förderung, Produktion und dem Transport von Kraftstoffen entstehen⁹.

Als **Zero Emission Vehicles (ZEV)** werden emissionsfreie Fahrzeuge nach den Abgasstandards des US-Bundesstaates Kalifornien bezeichnet¹⁰. Jedoch werden wichtige Faktoren wie Abrieb, Lärm und ähnliches nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund sind diese Fahrzeuge nicht im wörtlichen Sinne emissionsfrei.

Der **Modal Split** bezeichnet Anteil der einzelnen Verkehrsträger am Verkehrsaufkommen¹¹.

Unter **kombinierten Verkehr** eine mehrteilige Transportkette zu verstehen. Reise- bzw. Transportweg werden mit Hilfe verschiedener Verkehrsträger zurückgelegt. Ziel ist es, den Vor- und Nachlauf auf der Straße minimal zu halten¹².

⁶vgl. KALTSCHMITT ET AL. (2013) S. 15

⁷vgl. EUROPA.EU (2015), online

⁸vgl. VOIGT & HOPF (2013) S. 5-6

⁹vgl. SCHWISTER (2010) S. 380

¹⁰vgl. CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2015), online

¹¹vgl. GABLER (2016), online

¹²vgl. BMVI (2016c), online

3 Energieerzeugung

Die Energiequellen werden unterschieden in fossile Energieträger, regenerative Quellen und nukleare Energiequellen. Im folgenden Kapitel werden zu Beginn verschiedene Möglichkeiten der Energiegewinnung durch Kraftwerke kurz dargestellt. Die gewonnene Energie kann in verschiedenen Bereichen genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Verkehrssektor ausführlich dargestellt. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere die verschiedenen Antriebsmöglichkeiten relevant, deshalb werden die Möglichkeiten im mobilen Bereich vorgestellt.

Grundsätzlich sind Kraftwerke in thermische und nicht-thermische Kraftwerke zu unterscheiden (siehe Abbildung 3.1).

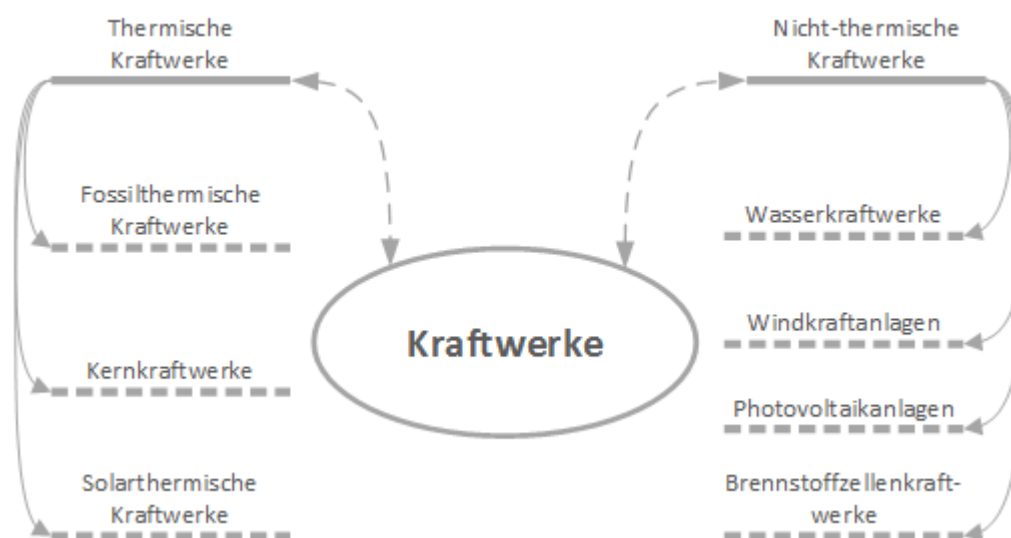


Abbildung 3.1: Kraftwerke nach Prozessart nach KONSTANTIN (2013) [eigene Darstellung]

Weiterhin können Kraftwerke nach der Nutzungsdauer unterschieden werden in:

- Grundlastkraftwerke
Diese Kraftwerke laufen über 7.000 Vollbenutzungsstunden im Jahr.
- Mittellastkraftwerke
Diese Kraftwerke laufen zwischen 4.500 bis 5.500 Vollbenutzungsstunden im Jahr.
- Spitzenkraftwerke
Diese Kraftwerke laufen unter 1.250 Vollbenutzungsstunden im Jahr.
- Reservekraftwerke¹

¹vgl. KONSTANTIN (2013) S. 286

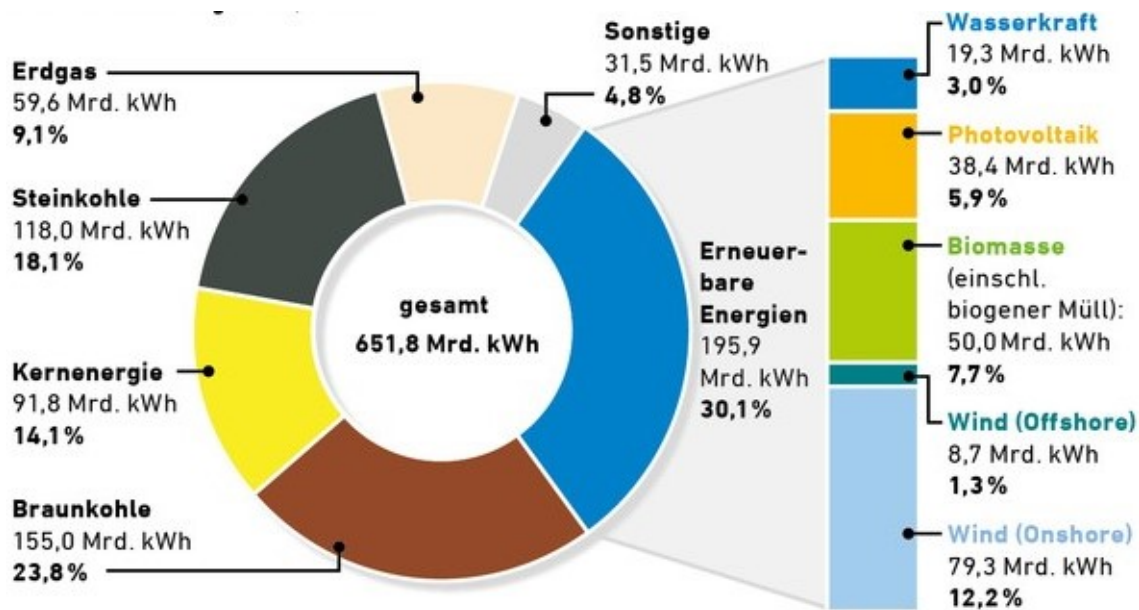


Abbildung 3.2: Strommix in Deutschland 2015 [AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (2016)]

3.1 Energie aus fossilen Energiequellen und Kernenergie

Zu den fossilen Energieträgern zählen Stein- sowie Braunkohle, Gas und Öl. Zur Energiegewinnung werden die fossilen Brennstoffe verbrannt. Durch die chemische Umwandlung wird Wärme freigesetzt. Bei Dampfkraftwerken, welche mit Öl oder Kohle befeuert werden, wird die Wärme zur Herstellung von Wasserdampf genutzt. Dieser Dampf treibt die Turbinen zur Stromerzeugung an. Gaskraftwerke hingegen können auf ein Zwischenmedium verzichten. Die Turbine wird direkt mit dem Brenngas betrieben.

3.1.1 Kohle

Kohle ist der wichtigste Energieträger zur Stromversorgung weltweit. Im Jahr 2013 betrug der Anteil der deutschen Bruttostromerzeugung durch kohlegefeuerte Kraftwerke ca. 45 %. Kohlekraftwerke sind Dampfkraftwerke. EU-weit erzeugen Kohlekraftwerke rund 26 % des Bruttostroms. Je nach Land schwankt der Anteil an der Kohleverstromung stark. Spitzenreiter sind mit einem Anteil von knapp 90 % des Bruttostroms Polen und Estland². Als Ausgangsstoff können sowohl Braun- als auch Steinkohle genutzt werden. Der Wirkungsgrad liegt bei Braunkohlefeuerung bei 43 % und bei Steinkohlefeuerung bei über 50 %. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung, falls es geeignete Abnehmer für die Abwärme im Umfeld des Kraftwerks gibt³. Unter Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Erzeugung

²vgl. WIETSCHER ET AL. (2015) S. 33-34

³vgl. KLEINKNECHT (2015) S. 45-46

von Wärme und Strom zu verstehen⁴. Ein großer Nachteil der Kohle deutschen Ursprungs ist der hohe Schwefelgehalt. Bei der Verbrennung wird Schwefeldioxid freigesetzt, welches zu saurem Regen führt. Allerdings können mit Hilfe von Kalkwasser die Schwefeldioxidemission stark reduziert werden⁵.

3.1.2 Erdöl

Erdöl als Energiequelle bietet viele Vorteile, die flüssige Form erleichtert Anwendung und Transport. In der Erdölraffinerie werden die vorliegenden Kohlenwasserstoffe separiert. Anschließend können sie für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Leichtere Bestandteile werden beispielsweise als Benzin oder Diesel weiterverwendet. Rund ein Drittel des Erdöls werden zur Energieerzeugung in Form von Wärme oder Strom genutzt. Dampfkraftwerke können statt mit Kohle ebenso mit Öl betrieben werden. Öl besitzt eine höhere Energiedichte als Kohle. Jedoch ist eine Befeuerung von Kraftwerken auf Grund der endlichen Ölreserven, bzw. aller fossilen Energiequellen, wirtschaftlich und ökologisch nicht sinnvoll. Vielmehr wird Erdöl in anderen Feldern genutzt. In der chemischen Industrie dient es als Ausgangsstoff für verschiedene Produkte. Außerdem dient es als Kraftstoff für verschiedene Verkehrsträger⁶.

3.1.3 Erdgas

Gaskraftwerke erzeugten 2014 rund 14 % des deutschen Bruttostroms. Die Gasturbinen werden durch das Verbrennen von Erdgas angetrieben. Insgesamt beträgt die installierte Kapazität 26,5 GW, was 16 % der gesamt installierten Kraftwerksleistung entspricht. Eu-weit beträgt der Anteil an der Stromerzeugung durch Gaskraftwerke im Mittel 23 %. Gaskraftwerke werden zur Mittel- und Spitzenlasterzeugung eingesetzt, da sie sichere Leistungen zur Verfügung stellen können. Weiterhin bieten sie im Vergleich zu kohlegefeuerten Kraftwerken zwei Vorteile. Zum einen sind sie flexibler einsetzbar. Und zum anderen erfordern sie deutlich geringere spezifische Investitionen⁷.

3.1.4 CCS-Technik

Durch die Nutzung der oben aufgeführten fossilen Energieträger wird das Klimagas CO₂ freigesetzt. Allerdings besteht mit Hilfe der sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS)-Technik die Möglichkeit der Reduktion des freigesetzten CO₂. Dazu wird das Gas aus dem Rauchgas von Kohlekraftwerken bzw. dem Synthesegas aus Vergasungsanlagen abgeschieden und anschließend gespeichert⁸. Dadurch ergeben sich erhebliche Einsparungsmöglichkeiten, welche im Hinblick

⁴vgl. SCHWISTER (2010) S. 450

⁵vgl. KLEINKNECHT (2015) S. 45-46

⁶vgl. KLEINKNECHT (2015) S. 47

⁷vgl. WIETSCHEL ET AL. (2015) S. 57

⁸vgl. WIETSCHEL ET AL. (2015) S. 77

auf die Klimaziele interessant sind. Es gibt verschiedene Verfahren zur CO₂-Abscheidung, es sollen im Folgenden lediglich die drei wichtigsten Möglichkeiten vorgestellt werden, um einen Einblick zu geben.

Im Post-Combustion-Verfahren erfolgt die Kohlendioxid-Abscheidung durch eine Rauchgaswäsche mit Hilfe chemischer Absorption. Bei dem sogenannten Oxyfuel-Verfahren werden kohlenstoffhaltige Brennstoffe mit reinem Sauerstoff verbrannt, wodurch eine stark erhöhte CO₂-Konzentration erreicht wird. Im Pre-Combustion-Verfahren wird das Kohlendioxid durch das Verbrennen eines wasserstoffreichen Synthesegases abgeschieden⁹.

3.1.5 Kernenergie

Kernkraftwerke sind ebenfalls thermische Kraftwerke und gewinnen Sekundärenergie mittels Kernspaltung. Als Brennstoff dient mit dem Isotop U-235 angereichertes Urandioxid. Die Anlagen, in denen die Reaktionen ablaufen, werden als Kernreaktoren bezeichnet. Der größte Teil, der zur Stromerzeugung genutzten Reaktoren sind Leichtwasser-Reaktoren. Diese werden in zwei verschiedenen Ausführungen gebaut, sogenannten Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren. Auf eine detaillierte Erläuterung soll verzichtet werden. Aber beide Bauarten betreiben eine Dampfturbine, welche den Strom erzeugt. Durch die einschränkenden Dampfparameter bedingt, liegt der Wirkungsgrad von Kernkraftwerken bei rund 35 %. Sie eignen sich als Grundlastanlagen¹⁰. Im Jahr 2015 wurden rund 14 % des deutschen Strombedarfs durch Kernkraftwerke gedeckt¹¹.

3.2 Energie aus regenerative Energiequellen

Im Weiteren werden die verschiedenen Möglichkeiten der Energiegewinnung durch regenerative Energien dargestellt.

3.2.1 Windenergieanlagen

Stromerzeugung durch Windenergie nutzt die Sonnenenergie indirekt. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmen sich die Erdoberfläche und die darüber liegenden Luftmassen. Je nach Region schwankt die Stärke der Einstrahlung stark. Landflächen erwärmen sich tagsüber stärker und kühlen nachts schneller aus als Wasserflächen. Die Luft steigt über erwärmten Regionen auf und es bilden sich Tiefdruckgebiete, während Hochdruckgebiete in kühleren Regionen entstehen. Die Luft strömt von Hoch- zu Tiefdruckgebieten – es entsteht Wind. Bei der energetischen Nutzung des Windes wird die Windenergie zu erst in mechanische Rotationsenergie und danach in elektrische Energie umgewandelt. Zur Energiegewinnung mittels Wind können zwei physikalische Prinzipien genutzt werden. Das Widerstandsprinzip beruht auf der Nutzung der

⁹vgl. WIETSCHEL ET AL. (2015) S. 88

¹⁰vgl. KONSTANTIN (2013) S. 313-314

¹¹vgl. AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (2016), online

Kraft, welche auf eine angeströmte Fläche wirkt. Dieses Prinzip wird beispielsweise bei alten Windmühlen genutzt. Moderne Anlagen hingegen nutzen das Auftriebsprinzip. Dabei dient die Auftriebskraft als Antriebskraft. Die Fläche der Flügeloberseite ist größer als die Unterseite. Dieser Größenunterschied führt dazu, dass die Luftgeschwindigkeit an der Oberseite größer ist. Daraus resultieren verschiedene Druckverhältnisse¹². Prinzipiell wird unterschieden zwischen Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen. Offshore-Windenergieanlagen sind aufgrund des starken und stetigen Windes auf hoher See interessant. Nach Schätzungen der European Wind Energy Association (EWEA) könnten bis 2030 in Europa rund 150 GW in Offshore-Windparks installiert werden. Onshore-Windenergieanlagen hingegen sind auf dem Land installiert. Im Jahr 2014 wurden durch Windenergie rund 9 % der deutschen Stromerzeugung bestritten. Insgesamt sind rund 24.900 Anlagen in Deutschland installiert. Je nach Bundesland unterscheiden sich Ausbaugrad und Akzeptanz stark¹³.

3.2.2 Photovoltaik

Bei der Photovoltaik erfolgt die Energiegewinnung durch die Umwandlung von solarer Strahlung. Ein Modul besteht aus: Solarmodulen, Verkabelungen, Wechselrichter und Aufständerung. Grundsätzlich werden zwei Technologien unterschieden.

Die kristalline Siliziumsolarzelle besteht aus einer rund 200 μm dicken Siliziumscheibe, in welche auf der der Sonne zugewandten Seite Phosphor-Atome eingebracht werden. Die Solarzelle absorbiert einfallende Sonnenstrahlen und es entstehen durch den sogenannten photovoltaischen Effekt Elektron-Loch-Paare. Diese Paare führen, da sie räumlich getrennt werden, zu einer Potenzialdifferenz und somit zu entnehmbaren elektrischen Leistung. Der Modulwirkungsgrad liegt bei dieser Technologie bei rund 15 %.

Bei der Dünnschicht-Technologie werden nur wenige 200 μm dünne Schichten verschiedener Materialverbindungen zur Absorption der Lichtquanten genutzt. Der Modulwirkungsgrad liegt zwischen 6 und 13 %¹⁴.

3.2.3 Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke nutzen ebenfalls die Strahlungsenergie der Sonne. Durch konzentrierende Spiegel erfolgt eine Bündelung der Sonnenstrahlung und anschließend eine Fokussierung auf einen sogenannten Receiver. Die absorbierte Sonnenenergie wird an das Medium im Receiver übertragen. Diese thermische Energie wird dann zum Antrieb eines Wärmekraftprozesses mittels Gasturbine und/oder Dampfmaschine bzw. Stirlingsmotor genutzt. Es gibt verschiedene Bauarten von solarthermischen Kraftwerken. Dazu zählen Solarturmkraftwerke, Parabolrinnenkraftwerke und Aufwindkraftwerke¹⁵.

¹²vgl. WIETSCHER ET AL. (2015) S. 103

¹³vgl. AXTHELM ET AL. (2015) S. 32-33

¹⁴vgl. WIETSCHER ET AL. (2015) S. 123-125

¹⁵vgl. UNGER & HURTADO (2014) S. 390-395

3.2.4 Wasserkraftwerke

Energie aus Wasserkraft ist die bereits am längsten genutzte erneuerbare Energie. Sie ist, anders als Energie aus Wind oder Photovoltaik, teilweise grundlastfähig. Die Wasserkraft ist gut berechenbar und unterliegt keinen kurzfristigen Schwankungen. Für die Nutzung wird die potenzielle Energie des Wassers zwischen zwei verschiedenen Spiegelhöhen zunächst in kinetische Energie umgewandelt. Anschließend wird die Energie in Wasserkraftanlagen durch Turbinen in Rotationsenergie und schließlich durch Generatoren in elektrische Energie umgewandelt¹⁶. In Deutschland ist das Potenzial für Wasserkraftwerke bereits ausgeschöpft und ein weiterer Ausbau nicht zu erwarten¹⁷. Der Anteil an der Stromerzeugung liegt in Deutschland relativ konstant bei rund 3,5 %. In anderen europäischen Ländern wie Norwegen oder Island basiert die Stromerzeugung nur auf Wasserkraft¹⁸.

3.2.5 Gezeitenkraftwerke

Eine Sonderform der Wasserkraftwerke sind Gezeiten-Kraftwerke. Sie nutzen den Tidenhub welcher durch Ebbe und Flut entsteht. Der mittlere, globale Gezeitenhub beträgt lediglich 1 m und ist nicht für die wirtschaftliche Nutzung geeignet. Jedoch ergeben sich an einigen Küsten durch Resonanzeffekte, Wind- und Meeresströmung hohe Gezeitenunterschiede. Die energetische Nutzung erfolgt mittels Turbinen. Weitere Sonderformen der Wasserkraftnutzung sind Meereswellen-, Meereströmungs- und Ozeanthermische Kraftwerke¹⁹. Es wird nicht auf diese Formen eingegangen, da die Anzahl der Anlagen weltweit gering ist.

3.2.6 Geothermiekraftwerke

Geothermiekraftwerke nutzen die Erdwärme. Für die Erdwärme gibt es drei verschiedene Quellen: Restwärme aus der Erdenstehungszeit, Wärme aus radiaktive Zerfall und Wärme durch Sonneneinstrahlung. Der überwiegende Wärmeanteil entsteht durch die radioaktiven Zerfallprozesse von Uran und Thorium. Es wird unterscheiden in oberflächennahe und erdkernnahe Anwendungen. Bei Anwendungen bis zu einer Tiefe von 400 m spricht man von oberflächennaher Geothermie. Dazu zählen beispielsweise Wärmepumpen. Tiefergehende Bohrungen werden als Tiefengeothermie bezeichnet. Geothermie kann ganzjährig und tageszeitunabhängig genutzt werden und ist damit grundlastfähig. Ein weiterer Vorteil ist der vielfältige Einsatz zur Strom- und Warmwassererzeugung sowie zum Heizen. Insgesamt beträgt die installierte Leistung für

¹⁶vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 334

¹⁷vgl. UNGER & HURTADO (2014) S. 202-203

¹⁸vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 333

¹⁹vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 347-353

Wärme und Strom in Deutschland circa 41 MW. Es besteht für die Nutzung tiefergeothermischer Wärme Gewinnung und -nutzung ein großes Potenzial. Der Bundesverband für Geothermie spricht von rund 300 Mrd. kWh pro Jahr²⁰.

3.2.7 Heizkraftwerk mit Biomasse

Der Energieträger Biomasse ist flexibler einsetzbar als die anderen erneuerbaren Energien. Aus diesem Grund eignet sich Biomasse am besten für den Einsatz im Grundlastbetrieb und damit als Ersatz für Kern- und Fossilkraftwerke²¹. Es ist auf Grund des geringen Heizwerts, bezogen auf das Volumen, auf kurze Transportweg zu achten. Aus diesem Grund sind kleine, dezentrale Anlagen sinnvoll. Zur thermischen Verwertung der Ausgangsstoffe können entweder die Pyrolyse, die Vergasung oder die Verbrennung genutzt werden. Zur bakteriellen Vergasung können Biomassesubstrate mit einem Feuchteanteil von mindestens 90 % verwendet werden²².

3.3 Antriebsarten im Verkehrssektor

Im Folgenden wird auf die verschiedenen insbesondere auf alternative Antriebsarten im Verkehr eingegangen. Alle Antriebsarten sind in 3.3 dargestellt²³.

Im Verkehrssektor werden ebenfalls die bereits genannten fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas genutzt. Der Einsatz von alternativen Antrieben kann sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Abhängigkeit vom Erdöl reduzieren. Deshalb gewinnt die Produktion bzw. Nutzung von Ersatzkraftstoffen immer mehr an Bedeutung. Auf Grund der Thematik der Arbeit folgt ein Überblick über alternative Antriebe sowie die Herstellung von biogenen Kraftstoffen für mobile Anwendungen. Am Ende des Kapitels sind in Abbildung 3.4 die verschiedenen alternativen Antriebsarten sowie die Abschätzung des Potenzials für die einzelnen Verkehrsträger dargestellt.

3.3.1 Biomasse

Pflanzenmaterial, also Biomasse, kann auf verschiedene Wegen zur Energiegewinnung genutzt werden. Es kann ebenso als Ausgangsstoff für die Herstellung von verschiedenen Kraftstoffen zum Einsatz kommen. Folgende Möglichkeiten werden unterschieden:

- Reine Pflanzenöle
Insbesondere für Dieselmotoren können reine Pflanzenöle in raffinierter Qualität eingesetzt werden.
- Biodiesel
Biodiesel bestehen aus veresterten Pflanzenölen. Dieselmotoren können, ohne vorherige

²⁰vgl. DEUTSCHES CLEANTECH INSTITUT (2012) S. 22-25

²¹vgl. UNGER & HURTADO (2014) S. 203-204

²²vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 433-434

²³vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S.116-117

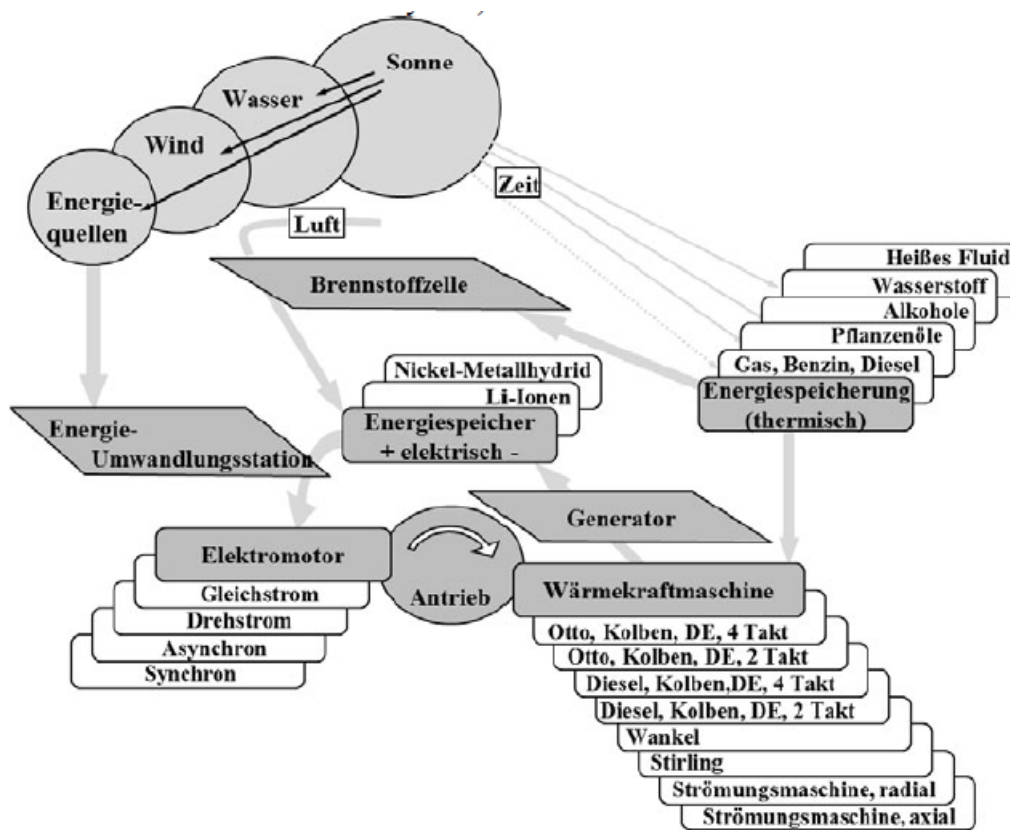


Abbildung 3.3: Antriebssystem, Energieträger, -speicher, und -umwandlungsanlagen [STAN (2015) S. 38]

Umbaumaßnahmen, direkt mit Biodiesel betrieben werden. Allerdings wird die Verwendung von Dichtungsmaterialien im Motor empfohlen, da Ester Lösungsmittel sind.

- Bioethanol
Ottomotoren können mit Bioethanol betrieben werden. Dieses Ethanol kann aus verschiedenen Pflanzen mittels Vergärung gewonnen werden.
- Biogas
Biogase, insbesondere Methan, können zum Betrieb von Ottomotoren eingesetzt werden.
- Synthetische Biokraftstoffe
Synthetische Biokraftstoffe werden auch als Synfuel, BtL (Biomass to Liquid) oder Sunfuel bezeichnet. Dazu wird Biomasse in einen flüssigen Kraftstoff umgewandelt. Als Ausgangsmaterial kann jede Biomasse genutzt werden. Die Biomasse wird verkocht, also auf Kohlenstoff reduziert. Mit Hilfe von Wasserdampf entstehen CO und H₂. Abschließend wird der Flüssigkraftstoff mit Hilfe des sogenannten Fischer-Tropsch-Verfahren oder der Methanol-Synthese, auf welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll, hergestellt. Das Produkt hat Ähnlichkeiten mit Kraftstoffen fossilen Ursprungs²⁴.

²⁴vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 433-434

3.3.2 Elektroantrieb

Elektromotoren funktionieren durch elektrisch generierte elektromagnetische Felder. Ein Feld kann in gleicher Lage bleiben (Gleichstrommotoren) oder sich drehen (Drehstrommotoren). Elektromotoren für mobile Anwendungen haben mehrere Vorteile, wie das schnelle Erreichen des maximalen Drehmoment, i. d. R. das Einsparen von Getriebe und Kupplung sowie die Möglichkeiten des Radantriebs mit integriertem Elektromotor. Momentan werden für automobiler Antriebe vorrangig folgende Motoren eingesetzt:

- Gleichstrommotoren ($n < 700 \text{ U/min}$)
z.B. Baoya
- Drehstrom-Asynchronmotoren ($n < 14.000 \text{ U/min}$)
z.B. Fiat
- Drehstrom-Synchronmotoren
z.B. BMW, Nissan, Mitsubishi
- Reluktanzmotoren
Prototyp der Universität der Bundeswehr

Die entscheidende Hürde für den Elektroantrieb sind die **Batterien**. Elektroenergiespeicher werden nach Betriebstemperatur in kalte Batterien und Batterien mit flüssigen Elektrolyten unterschieden. Letztere werden aus Sicherheitsgründen wenig in der Automobilindustrie eingesetzt. Der große Nachteil ist die geringe Energiedichte²⁵.

3.3.3 Wasserstoffantrieb

Fahrzeuge, welche mit Hilfe einer **Brennstoffzelle** angetrieben werden, verwenden einen Elektromotor. Dabei erfolgt die Stromerzeugung durch Umkehrung der Elektrolyse in der Brennstoffzelle. Durch die Reaktion von Wasserstoff und Luftsauerstoff zu Wasser werden elektrische Energie und Wärme abgegeben. In diesem Prozess wird chemische Bindungsenergie in elektrische Energie umgewandelt, welche zum Antrieb des Elektromotors dient. Es werden so genannte PEM-Brennstoffzellen (Polymer-Elektrolyt-Membran) genutzt. Durch eine Membran werden Wasserstoff und Sauerstoff, welche jeweils die Anode bzw. die Kathode umspülen, getrennt. An der Anode entstehen Ionen und Elektronen durch Trennung des Wasserstoffs. Die Wasserstoffelektronen aber können im Gegensatz zu den Wasserstoffionen nicht durch die PEM wandern. Deshalb fließt elektrischer Strom. Brennstoffzellen-Antriebe bieten mehrere Vorteile. Sie sind effizient, leise und emissionsfrei. Ein Auto mit Brennstoffzelle ist ein Zero Emission Vehicle (ZEV). Weiterhin ermöglicht der drehmomentstarke Elektromotor eine stufenlose Beschleunigung²⁶.

Mit Hilfe von solarer oder nuklearer Energie kann aus Wasser **Wasserstoffgas** gewonnen und

²⁵vgl. STAN (2015) S. 282-292

²⁶vgl. STAN (2015) S. 260-261

anschließend durch Kompression verflüssigt werden. Verwendung findet Wasserstoffgas in Verbrennungsmotoren in Industrie und in Fahrzeugen. Bei Fahrzeugen ist besonders auf einen sicheren Umgang zu achten²⁷.

3.3.4 Hybridantriebe

Inzwischen gibt es viele verschiedene Hybridantriebe welche in Serie produziert werden. Prinzipiell werden Hybridantriebe in 3 Grundarten eingeteilt. Batteriebetriebene Fahrzeuge haben eine begrenzte Reichweite. Dies kann mit Hilfe des Einbaus von Reichweitenverlängerern kompensiert werden. Bei einem **seriellen Hybridantrieb** betreibt ein zusätzlicher Verbrennungsmotor einen Generator, welcher falls nötig die Batterie nachlädt. So treibt der Verbrennungsmotor indirekt über den Elektromotor das Fahrzeug an. Zwar geht mit dem zusätzlichen Wandlungsschritt Energie verloren, jedoch kommt es, auf Grund des optimalen Betriebs des Verbrennungsmotors, trotzdem zu Effizienzgewinnen.

Bei sogenannten **parallelen Hybridantrieben** können Elektro- und Verbrennungsmotor gleichzeitig oder unabhängig von einander mechanische Energie für den Antrieb liefern, da sie beide auf der Antriebsstange geschaltet sind.

Leistungsverzweigende Hybridantriebe werden auch als Mischhybridantrieb bezeichnet. Sie verbinden die beiden oben genannten Ansätze miteinander. Der Verbrennungsmotor kann sowohl die Batterie direkt oder indirekt laden als auch gleichzeitig zum Antrieb und Beladen dienen²⁸.

²⁷vgl. ZAHORANSKY ET AL. (2015) S. 116-117

²⁸vgl. GÜNTHER (2014) S. 107

Verkehrsträger											
Strassenverkehr	Verkehrsträger	Elektrizität		Stromkraftstoffe		Power-to-Gas/Liquid		Biotkraftstoffe			
		Batterie	Überleitung	Wasserstoff	Methan	Wasserstoff	Methan	Pflanzenöl	Biodiesel	Bioethanol	Biomass-to-Liquid
Strassenverkehr	Personenverkehr										
	• Kurzstrecke										
	• Mittelstrecke										
	• Langstrecke										
	• Busse										
Strassenverkehr	Güterverkehr										
	• Nahverkehr										
	• Fernverkehr										
Energieträger											
Weitere Verkehre	Verkehrsträger	Elektrizität		Stromkraftstoffe		Power-to-Gas/Liquid		Biotkraftstoffe			
		Batterie	Überleitung	Wasserstoff	Methan	Wasserstoff	Methan	Pflanzenöl	Biodiesel	Bioethanol	Biomass-to-Liquid
	Schienenverkehr										
	• Personen- & Güterverkehr										
	Schiffsverkehr										
Weitere Verkehre	• Binnen- & Seeschifffahrt										
	Flugverkehr										
	• zivil & militärisch										
		sehr gut geeignet	gut geeignet	gut geeignet	prinzipiell geeignet/ Forschungsbedarf	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet

Abbildung 3.4: Matrix verschiedene Antriebsarten nach STERNER & STADLER (2014) S. 154
[eigene Darstellung]

4 Energieaufwand und CO₂-Emission

Energie ist eine wichtige Grundlage für eine funktionierende, moderne Gesellschaft. Sie ist ein Wirtschaftsgut, dass das Verrichten von Arbeit, das Erzeugen von Licht sowie Wärme und das Funktionieren der Wirtschaft im allgemeinen ermöglicht. Dies zeigt die enorme Bedeutung von Energie im sozialen, politischen wie auch wirtschaftlichen Kontext.

Seit Beginn der Industrialisierung am Ende des 19. Jahrhunderts werden fossile Brennstoffe im großen Stil zur Energiegewinnung genutzt. Der größte Teil der gewonnenen Energie beruht auf Verbrennung und führt zu einer CO₂-Emission. Weltweit werden pro Jahr zur Zeit 36 Milliarden t CO₂, mit steigender Tendenz, emittiert¹. Der tatsächliche Ausstoß schwankt weltweit stark. Abbildung 4.1 zeigt exemplarisch die großen regionalen Unterschiede der Emission pro Einwohner.

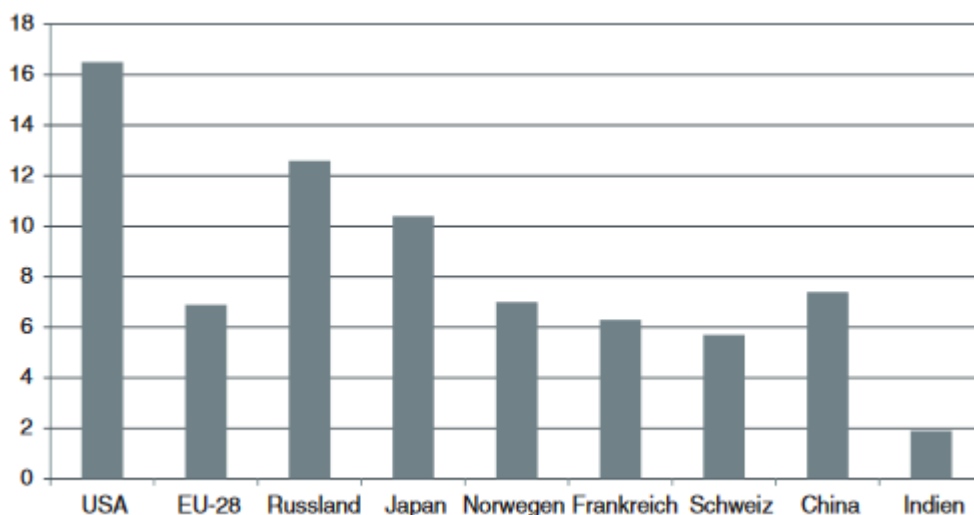


Abbildung 4.1: CO₂-Emission [t] je Einwohner für 2013 [KLEINKNECHT (2015) S. 60]

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist eins der wichtigsten Treibhausgase und bedingt rund 20 % des Treibhauseffektes. Die Bemühungen zur CO₂-Reduktion sind äußerst wichtig, da insgesamt rund 60 % des Treibhauseffekts anthropogenen Ursprungs sind. CO₂ bewirkt, wie alle Treibhausgase, dass die kurzwellige Sonnenstrahlung fast ungehindert zur Erdoberfläche gelangt. Die an der Erdoberfläche zurückgestrahlte langwellige Infrarotstrahlung wird von dem CO₂ absorbiert und dies führt zu einer Rückstrahlung der Sonne und letztendlich zu einer Erwärmung². Durch den Verkehr werden natürlich weitere klimawirksame Stoffe freigesetzt. Allerdings sollen

¹vgl. KLEINKNECHT (2015) S. 59

²vgl. MALBERG (2002) S. 296-298

diese in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem aktuellen Forschungs- sowie Wissensstand zur CO₂-Emission und den Energieverbräuchen. Bei der Darstellung werden Europa und insbesondere Deutschland berücksichtigt.

4.1 Status Energieaufwand und CO₂-Emission in Europa

Im folgenden Abschnitt wird der Status des Energieaufwandes und der CO₂-Emission in Europa dargestellt. Diese Darstellungen sind knapp gehalten, da der Fokus der Betrachtungen auf Deutschland liegt.

Zu Beginn werden jeweils die Daten zum Verkehr dargestellt. Anschließend werden kurz weitere Sektoren beleuchtet, um die Größenordnung einschätzen zu können.

4.1.1 Verkehr

Insgesamt ergab sich im Verkehrssektor für das Jahr 2013 für die EU-28 ein Energieaufwand von 349 Mio. t Rohöleinheiten (RÖE). Seit 2007, insbesondere seit Beginn der Wirtschafts- und Finanzkrise 2008, ist der Energieaufwand im Verkehr leicht rückläufig. Insgesamt ist EU-weit der Verbrauch im Verkehr zwischen 2007 und 2013 um 13 % gesunken. Jedoch sind Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsträgern festzustellen (Abbildung 4.2).

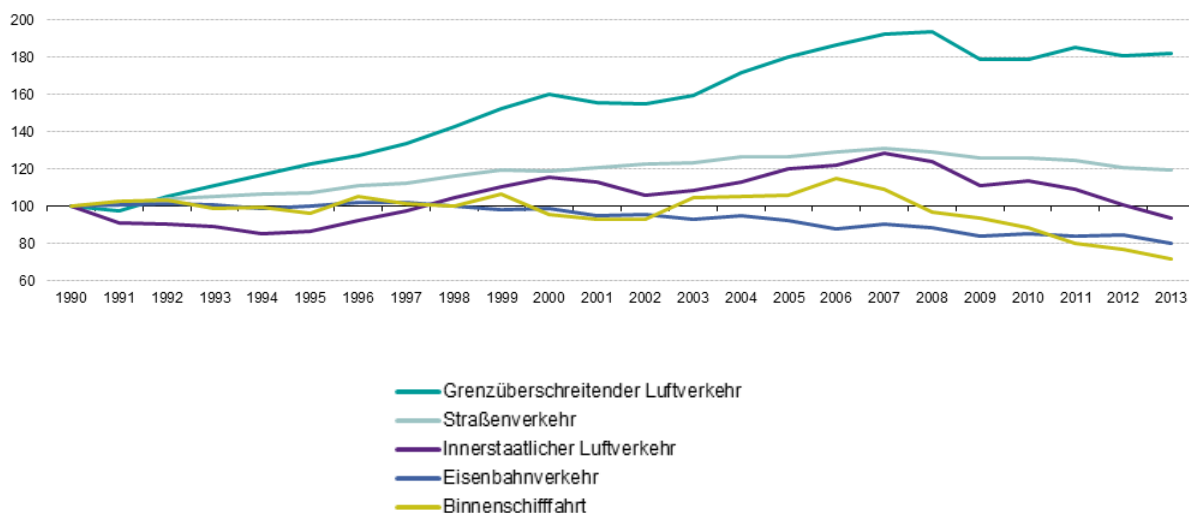


Abbildung 4.2: Entwicklung Endenergieverbrauch, EU-28 [%][EUROSTAT (2016)]

Straße

Der Straßenverkehr wies im Zeitraum 1990-2013, ebenso wie der Luftverkehr, einen Anstieg des Endenergieverbrauchs auf. In absoluten Werten heißt das, dass der Straßenverkehr einen Zuwachs von 47,0 Mio. t RÖE in dem genannten Zeitraum verzeichnete.

4.1.2 Luft

Der Energieaufwand im Luftverkehr nahm besonders stark zu, so geht man im Zeitraum von 1990 bis 2008 von einer Steigerung um 93,8 % aus. Jedoch stagniert der Verbrauch, im Rahmen gewisser Schwankungen, seitdem weitestgehend. Weiterhin muss zwischen innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Luftverkehr differenziert werden. Im innerstaatlichen Luftverkehr wurde der Verbrauch um rund 0,3 Mio. t RÖE, was 6,1 % seit 1990 entspricht, reduziert. Im grenzüberschreitenden Luftverkehr hingegen stieg der Energieaufwand im selben Zeitraum (1990-2013) um 19,7 Mio. t RÖE.

Wasser

Innerhalb der EU werden 40 % der gehandelten Güter auf dem Seeweg transportiert. Die Binnenschifffahrt verzeichnet einen starken Energieaufwandrückgang. Insgesamt liegt der Verbrauch um 1,8 Mio. t RÖE niedriger als 1990³. Auch im Bereich der Schifffahrt konnten mit Hilfe von Technik und allgemeiner Effizienzsteigerung die CO₂-Emissionen in den letzten Jahren reduziert werden. Die Schifffahrt verursacht weltweit 10 % der CO₂-Emissionen⁴.

Schiene

Im Eisenbahnverkehr belief sich der Rückgang zwischen 1990 bis 2013 auf 1,6 Mio. t RÖE⁵. Der Energieaufwand spiegelt auch die unterschiedliche Nutzung der Verkehrsträger. Natürlich sind auch technologische Veränderungen, Effizienzsteigerung und Einbußen bei der Kraftstoffeffizienz zu berücksichtigen.

4.1.3 weitere Sektoren

Beim Endenergieverbrauch in der EU-28 ergeben sich im Jahr 2013 drei Hauptverbrauchergruppen: der Verkehr (31,6 %), die privaten Haushalte (26,8 %) und die Industrie (25,1 %). Weiterhin wurden in Summe durch die 28 EU-Mitgliedsländer im Jahr 2012 4,6 Milliarden t CO₂-Äquivalente emittiert. Durchschnittlich verursachte jeder EU-Bürger 9,0 t CO₂⁶. Die gesamten Emissionen sind nach Quellkategorien unterteilt in Abbildung dargestellt.

³vgl. EUROSTAT (2016), online

⁴vgl. VDR (2015) S. 18

⁵vgl. EUROSTAT (2016), online

⁶vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015c)

Treibhausgas-Emissionen der EU-28 nach Quellkategorien in Mio. t CO ₂ -Äquivalenten													
Treibhausgasquellen und -senken	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012		
Energie	4.325	4.058	4.004	4.103	4.107	4.044	3.961	3.678	3.783	3.642	3.604		
Industrieprozesse	462	441	394	403	401	412	388	324	335	332	321		
Verbrauch an Lösungsmitteln und anderen Produkten	17	14	14	12.288	12	12	11	10	11	10	10		
Landwirtschaft	617	533	521	493	490	490	489	478	475	475	469		
Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF)	-258	-291	-302	-304	-333	-268	-328	-334	-312	-311	-304		
Abfall	206	207	190	166	164	160	156	152	147	144	141		
Sonstige	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Gesamt (einschließlich LULUCF)	5.368	4.963	4.819	4.874	4.840	4.850	4.679	4.309	4.439	4.292	4.241		
Gesamt (ohne LULUCF)	5.626	5.253	5.122	5.178	5.173	5.119	5.006	4.642	4.751	4.603	4.544		

Abbildung 4.3: Entwicklung CO₂-Emissionen in der EU nach Quellkategorien [UMWELTBUNDESAMT (2014)]

4.2 Status Energieaufwand und CO₂-Emission in Deutschland

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Situation in Deutschland und Europa. Dabei wird in der Darstellung zwischen den Bereichen Verkehr, Haushalte, Industrie und Landwirtschaft differenziert. Bei der Beschreibung des Verkehrssektors werden in die einzelnen Verkehrsträger unterschieden.

Der gesamte deutsche Endenergieverbrauch des Jahres 2014 ist in Abbildung 4.4 nach den einzelnen Sektoren unterteilt dargestellt. Insgesamt wurden 2014 2.402 TWh an Endenergie in

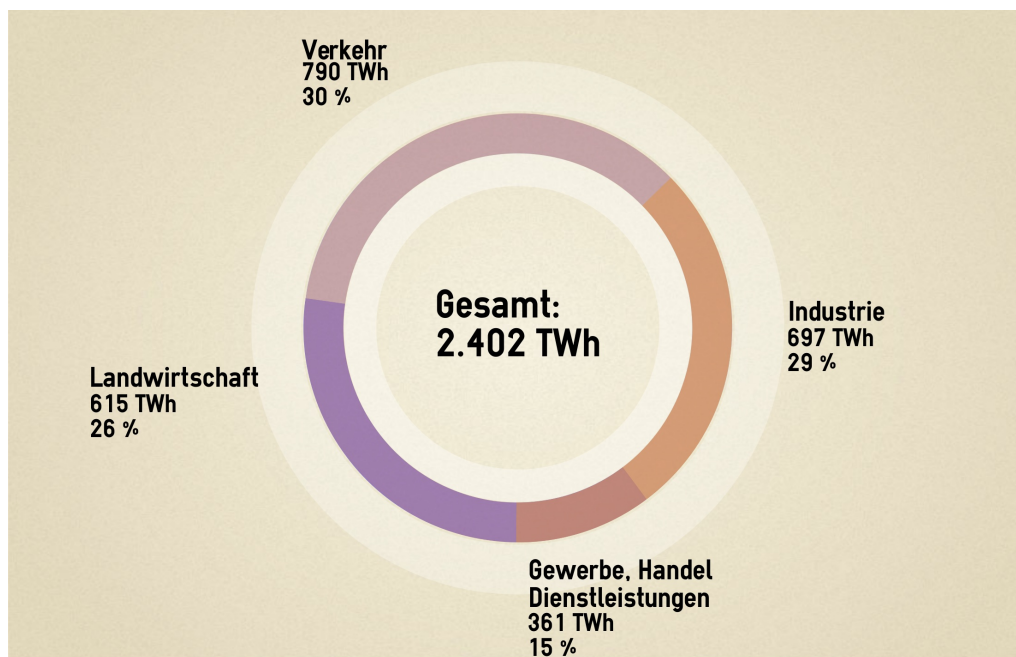


Abbildung 4.4: Endenergieverbrauch nach Sektoren nach UMWELTBUNDESAMT (2015b) [eigene Darstellung]

Deutschland verbraucht.

Im Jahr 2015 wurden in Deutschland rund 800 Mio. t CO₂ emittiert, welche größtenteils aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen. Allerdings ist der prozentuale Anteil, auf Grund des Rückgangs der anderen Treibhausgase, insgesamt gestiegen⁷.

4.2.1 Verkehr

Der Verkehrssektor nutzte im Jahr 2014 rund 30 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs, das entspricht 730 TWh. Dabei entfallen rund 98 % des Verbrauchs durch den Verkehr auf Kraftstoffe und lediglich 2 % auf Strom. Im Jahr 2012 differenzierte sich der gesamte Kraftstoffverbrauch in: 49,7 % Diesel 29,5 % Benzin, 14,8 % Flugkraftstoffe und 1,4 % auf Flüssig- sowie Erdgas. Der Strom wurde vorrangig im Schienenverkehr verbraucht, da dort zu 98 %

⁷vgl. GÜNTHER (2016) S. 68

Strom als Energieträger dient. Der Abbildung 4.5 sind die Endenergieverbräuche der einzelnen Verkehrsträger in den letzten Jahren zu entnehmen⁸.

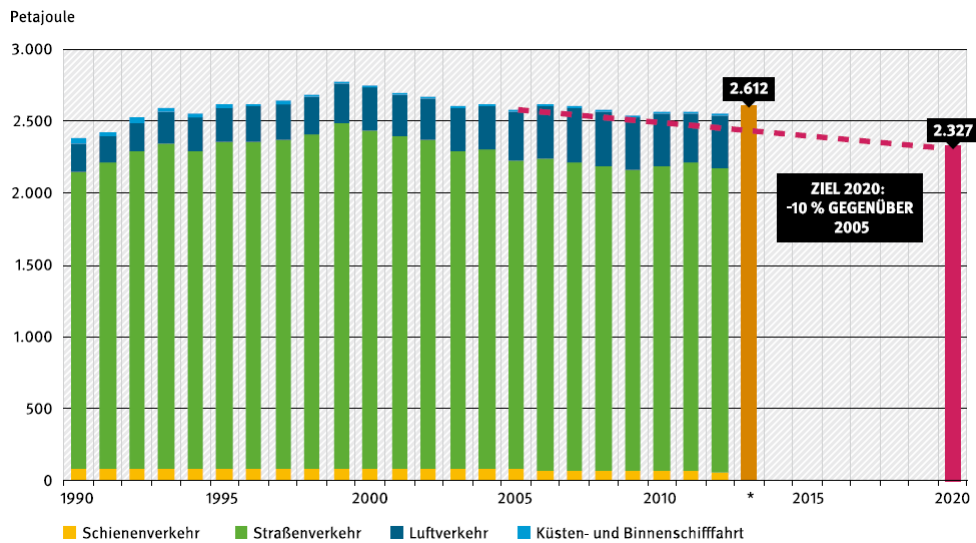


Abbildung 4.5: Endenergieverbrauch des Verkehrs [UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 110]

Der Energieaufwand des Verkehrs ist in den letzten Jahren leicht zurück gegangen (siehe 4.5). Gründe sind laut IFEU der geringe Anstieg oder Rückgang der Verkehrsleistung und der Effizienzgewinn⁹.

Der Verkehrssektor hat weltweit einen großen Anteil am Ausstoß von Kohlendioxid. Wirtschaftswachstum und CO₂-Emissionen sind aneinander gebunden und eine Entkopplung ist bisher nicht gelungen. Die durch Mobilität entstehenden CO₂-Emissionen entsprechen rund 20 % der durchschnittlichen Gesamtemissionen pro Kopf in Deutschland, was 2014 164 Mio. t CO₂-Emissionen entsprach¹⁰ und stellen somit eine wichtige Stellschraube für die Klimabilanz dar. Analog zum Energieaufwand ist eine Stagnation der Emission von CO₂ in den letzten Jahren in Deutschland festzustellen¹¹.

Mit Hilfe der Abbildungen 4.6 bzw. 4.7 ist ein Überblick über den spezifischen Energiebedarf sowie die CO₂-Emissionen der einzelnen Verkehrsmittel möglich.

Straße

Der Straßenverkehr verbrauchte 2014 607 TWh Endenergie. Hauptsächlich sind Diesel- und Ottokraftstoffe zum Einsatz gekommen¹². Eine genaue Aufschlüsselung ist der Tabelle „Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014“ im Anhang zu entnehmen.

⁸vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 29, 110

⁹vgl. IFEU (2012) S. 39

¹⁰vgl. BAUERNHANSL (2014) S. 143

¹¹vgl. IFEU (2012) S. 40

¹²vgl. AGE (2016), online

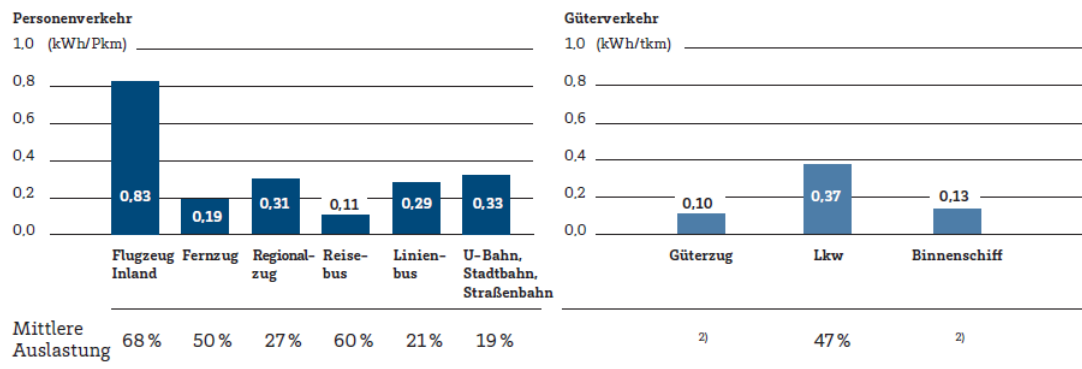


Abbildung 4.6: Spezifischer Energiebedarf 2012 [VDV (2014) S. 10]

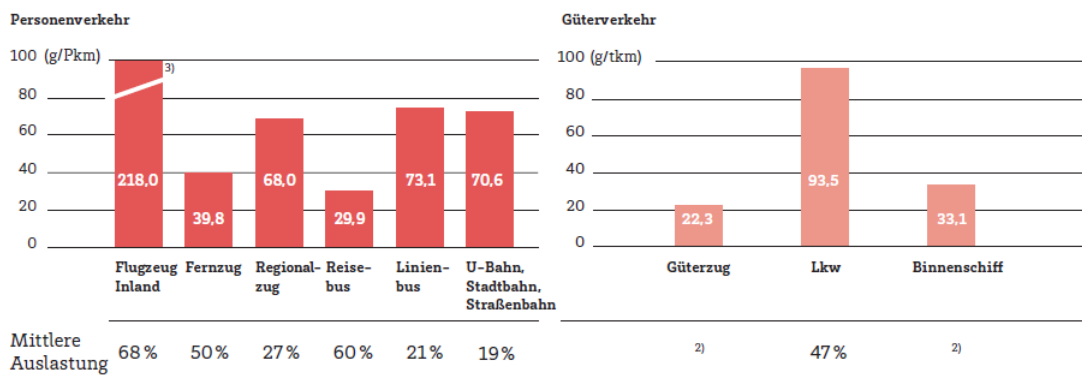


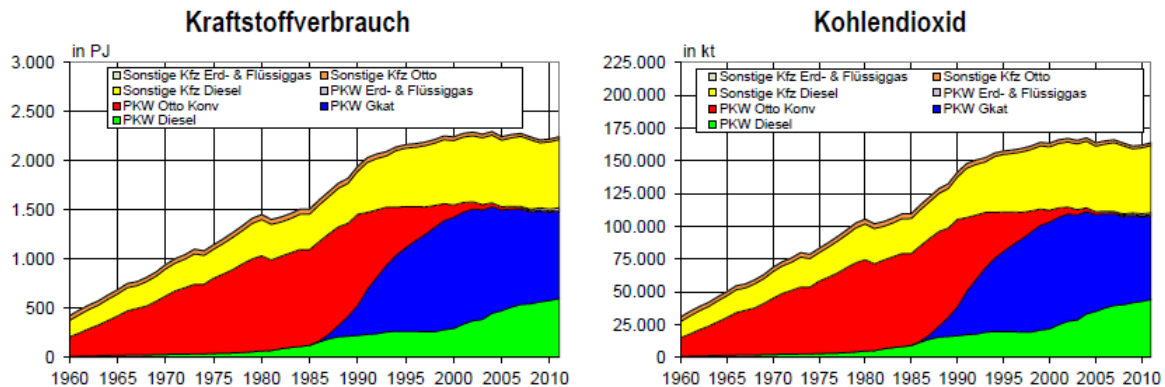
Abbildung 4.7: Spezifische Kohlenstoffdioxidemission 2012 [VDV (2014) S. 10]

Der Kraftstoffverbrauch sowie die CO₂-Emissionen sind seit 1990 abgesehen von geringen jährlichen Schwankungen konstant. Der Einfluss des Pkw-Verkehrs auf den Energieaufwand lässt sich gut an den folgenden Werten erläutern. So lag beispielsweise 2012 der Primärenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland bei 19 %. Der Energieaufwand ist in den letzten Jahren im Verkehrsbereich gewachsen obwohl der Primärenergieverbrauch in Deutschland insgesamt seit 1990 um 7,7 % gesunken ist. Grund für diese Entwicklung ist die Effizienzsteigerung in allen Sektoren und der Einsatz von erneuerbaren Energien sowie Erdgas statt Kohle¹³. Der inländische Güterverkehrsaufwand (entspricht: Fahrleistung [km]*beförderte Tonnen) stieg zwischen 1999 bis 2012 um 27,4 %. Daraus resultieren erhebliche Mehrbelastungen für Mensch und Umwelt.

Die folgende Darstellung orientiert sich am TREMOD 5.3 Bericht des IFEU (siehe 4.8). Der Bestand an Fahrzeugen ist die Grundlage, um Aussagen über Fahrleistungen sowie Emissionen treffen zu können. Als Bezugsgröße dient bei TREMOD der in Deutschland registrierte Bestand. Der Bestand an PKW und leichten Nutzfahrzeugen ist leicht angestiegen. Die Be-

¹³vgl. KREYENBERG (2016) S. 47-48

standsentwicklung für schwere Nutzfahrzeuge hingegen ist rückläufig¹⁴.



Abbildungung 4.8: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen Straßenverkehr Deutschland 1990-2011 [IFEU (2012) S. 42]

Die Straße ist mit Abstand der Verkehrsträger mit der höchsten CO₂-Emission (siehe 4.6 bzw. 4.7). Über die Hälfte der CO₂-Emissionen entsteht durch die 43 Mio. Pkw in Deutschland. Somit entfallen allein auf die Mobilität pro Jahr und Person rund 2,4 t CO₂¹⁵.

Luft

Laut dem Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft lag 2014 der Kerosinbedarf pro Person und 100 km bei 3,64 l. Daran ist die Effizienzsteigerung im Personenluftverkehr in den vergangenen Jahren ablesbar. 1990 bspw. lag der Verbrauch der deutschen Flotte bei 6,3 l pro Person und 100 km. Im Frachtverkehr werden pro 100 kg Fracht und 100 km durchschnittlich 1,83 l benötigt¹⁶. Bei dieser Darstellung ist zu berücksichtigen, dass der Energieaufwand im Luftverkehr insgesamt gewachsen ist. Im Betrachtungszeitraum 1990 bis 2013 beträgt der Anstieg des Endenergieverbrauchs rund 8 %¹⁷.

Eine Besonderheit bei der Betrachtung des Luftverkehrs sind die zwei möglichen Ansätze. Nach den Vorgaben des Kyoto-Monitoring wird bei der CO₂-Emissionsbestimmung nur der innerdeutsche Verkehr berücksichtigt, da eine Zuordnung des internationalen Verkehrs zu kompliziert sei. Dieser Ansatz zieht nach sich, dass die Emissionen nur teilweise erfasst werden. Bei dem sogenannten Standortprinzip hingegen werden Flüge und die damit verbundenen Emissionen dem Startflughafen zugeordnet. Dieses Verfahren ermöglicht eine vollständige Erfassung aller Emissionen¹⁸. Im Flugverkehr wird der größte Anteil des Kraftstoff unter wechselnden atmosphärischen Rahmenbedingungen verbrannt. Dadurch unterliegen auch die Schadstoffemissionen Schwankungen. Die CO₂-Emissionen werden nach den Flugstrecken differenziert. Im

¹⁴vgl. KREYENBERG (2016) S. 23

¹⁵vgl. BAUERNHANSL (2014) S. 143

¹⁶vgl. BDL (2015) S. 2-5

¹⁷vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 110.

¹⁸vgl. SCHUBERT ET AL. (2014) S. 353

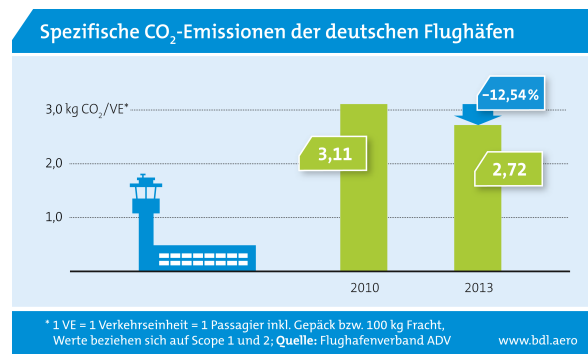


Abbildung 4.9: Spezifische Emissionen deutscher Flughäfen [BDL (2015) S. 7]

Jahr 2013 wurden 0,25 % der gesamten CO₂-Emissionen durch den innerdeutschen Luftverkehr verursacht. Neben den durch den Flug bedingten CO₂-Emissionen können auch die spezifischen Emissionen der Flughäfen verringert werden (siehe 4.9)¹⁹. Ein Überblick über Energiebedarf und CO₂-Emissionen ist ebenfalls den Abbildungen 4.6 bzw. 4.7 zu entnehmen.

Wasser

Per Schiff können sowohl Container, Flüssigkeiten als auch festes Massengut transportiert werden. Ein Binnenschiff benötigt ca. 1,3 l Diesel je 100 tkm an Primärenergie. Damit haben Binnenschiffe im Vergleich zu Bahn (1,7 l/100 tkm) und Lkw (4,1 l/100 km) den geringsten Energiebedarf. Daraus resultiert auch die relativ geringe Schadstoffemission, welche bei 33,4 g/tkm liegt (siehe auch 4.6 bzw. 4.7). Insgesamt stagniert die Güterbeförderung im Binnenschiffverkehrsbereich in Deutschland. Gründe dafür sind unter anderem die Personalkosten, Änderungen in der Produktion und die unvollendete Harmonisierung von Abgaben sowie Förderbedingungen innerhalb der EU²⁰. Die Seeschifffahrt hingegen wächst kontinuierlich, da sowohl der Welt- als auch der Weltseehandel zunehmen. Der Hamburger Hafen zählt zu den wichtigsten Häfen in der EU²¹.

Schiene

Der Schienenverkehr verbrauchte 2014 15 TWh Endenergie überwiegend in der Form von Strom. Jedoch wurde in Deutschland hauptsächlich Strom aus Kohlekraftwerken genutzt. Mit Blick auf die CO₂-Bilanz muss die Herkunft der elektrischen Energie bei einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Der Verkehrsträger Schiene gilt als umweltfreundlich. Die systembedingten energetischen Vorteile der Eisenbahn führen zu einem vergleichsweise geringen Energieeinsatz. Grund dafür sind zwei Effekte. Zum einen die geringe Reibung zwischen Rädern und Fahrweg. Und zum anderen der geringe aerodynamische Widerstand bei Zugbildung²².

¹⁹ vgl. BDL (2015) S. 6-7

²⁰ vgl. WASSER UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES (2014)

²¹ vgl. VDR (2015) S. 18

²² vgl. HECHT (2011) S. 12-13

Pro Jahr werden rund 600 Mio. t Güter in Deutschland auf der Schiene transportiert. Dadurch können pro Tag rund 77.000 Lkw ersetzt werden. Trotz des streikbedingten Rückgangs 2014 bzw. 2015 beschreibt der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) eine positive Entwicklung des Schienengüterverkehrs. Weiterhin werden in Deutschland über 100 Mrd. Tonnen-km durch den Schienengüterverkehr gefahren²³.

Die CO₂-Emissionen im Schienenverkehr sind abhängig vom fossilen Kraftstoff bzw. vom verwendeten Strommix. Beispielsweise wurde 2014 von der Deutschen Bahn dieser Strommix genutzt:

- Erneuerbare Energien - 40,0 %
- Kernenergie - 16,0 %
- Steinkohle - 27,2 %
- Braunkohle - 9,8 %
- Erdgas - 5,8 %
- Sonstige - 1,2 %²⁴.

In Deutschland konnten sich die Personenverkehrsleistungen von 1960 bis 2012 ungefähr vervierfachen. Jedoch blieb die Verkehrsleistung des Personenschienenverkehrs im selben Zeitraum nahezu konstant, weshalb der Anteil des Schienenverkehrs am Modal Split sank.

Der TREMOD Bericht zeigt außerdem, dass der Anteil der CO₂-Emissionen im Gütertransport auf der Schiene anteilig von 51 % auf 18 % reduziert werden konnte. Insgesamt werden pro transportierte Tonne rund die Hälfte an CO₂-Emissionen im Vergleich zum Lkw- und Flugverkehr eingespart²⁵. Pro Tonnen-km werden im deutschen Schienengüterverkehr rund 22 g CO₂ emittiert. Ein Lkw hingegen emittiert 94 g/tkm²⁶ (siehe Abbildungen 4.6 bzw. 4.7).

In der Tabelle 4.1 werden die einzelnen Verbräuche im Schienenverkehr aufgelistet. Die Daten stammen aus der Statistik des VDV und stimmen im Großen und Ganzen mit den Informationen des Umweltbundesamtes überein.

Zu berücksichtigen ist, dass die Emissionen in CO₂-Äquivalente angegeben werden. Dazu werden neben CO₂ anteilig auch N₂O und CH₄ berücksichtigt.

4.2.2 Haushalte, Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Im Jahr 2014 verursachten die Haushalte rund 26 % der Endenergieverbrauchs. Der Sektor Industrie verbrauchte im Jahr 2014 29 % der gesamt genutzten Endenergie und Gewerbe, Handel

²³vgl. VDV (2016)

²⁴vgl. DEUTSCHE BAHN BDEW (2015), online

²⁵vgl. IFEU (2012) S. 32-34

²⁶vgl. VDV (2014)

Verkehrsmittel	Energieaufwand [kwh/tkm]	CO ₂ -Emission [g/tkm]
Güterzug	0,1	22,3
Fernzug	0,19	39,8
Regionalzug	0,31	68
U-Bahn, Stadtbahn und Straßenbahn	0,33	70,6

Tabelle 4.1: Spezifische Verbräuche bzw. Emissionen für die Schiene nach [VDV (2014) S. 10]

und Dienstleistungen verursachten rund 15 % des Endenergieverbrauchs²⁷. Die Zusammensetzung der Energieträger ist sehr unterschiedlich (siehe Abbildung 4.10). Im Gegensatz zum Verkehr gewinnen die anderen Sektoren ihre Energie auf Basis vieler verschiedener Energieträger.

Sektor	Treibhausgas-Emission [%]	Treibhausgas-Emission [Mio. t]
Energiewirtschaft	39	355
Industrie	21	187
Haushalte	10	88
Landwirtschaft	8	70
Gewerbe, Handel & Dienstleistungen	4	35

Tabelle 4.2: Emissionen weitere Sektoren 2014 nach [UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 12-18]

In der Tabelle 4.2 sind die Emissionen der verschiedenen Sektoren zusammengestellt. Zum Vergleich: der Sektor Verkehr emittierte 2014 164 Mio. t Kohlendioxid-Äquivalente. Zu beachten ist, dass in der Tabelle die Kohlendioxid-Äquivalente mit einbezogen werden, welche rund 59 Mio. t ausmachen. 2014 wurden insgesamt 800 Mio. t reines Kohlenstoffdioxid emittiert²⁸. Umgerechnet auf die Einwohnerzahlen bedeutet dies, dass der deutsche Durchschnitt bei 11,5 t pro Jahr und Einwohner liegen. Dieser Wert liegt deutlich über dem europäischen Durchschnitt (vgl. Kapitel 4.1.3)²⁹.

Zur Bewertung der These ist keine detaillierte Darstellung sondern nur die Größenordnungen von Energieaufwand und Emissionen der einzelnen Sektoren notwendig.

²⁷ vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015b)

²⁸ vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015a) S.12-18

²⁹ vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015c)

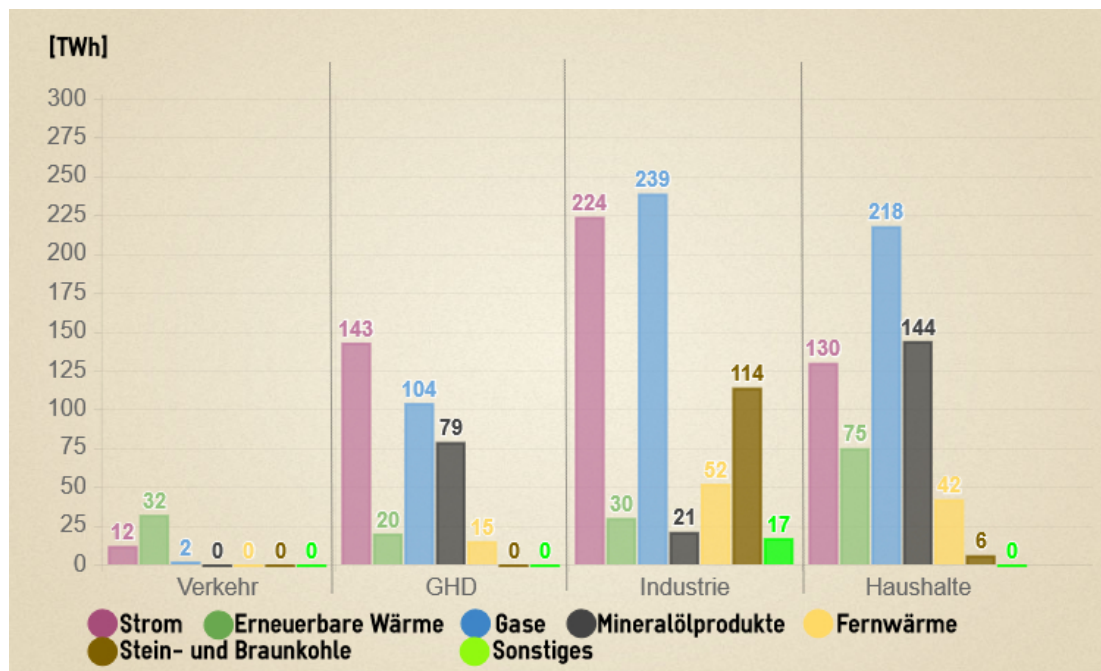


Abbildung 4.10: Zusammensetzung des Endenergieverbrauch der einzelnen Sektoren 2014 nach UMWELTBUNDESAMT (2015b)[eigene Darstellung]

4.3 Tendenzen

Auf Grund der Entwicklungen der letzten Jahren sowie den im folgenden Kapitel vorgestellten politischen Rahmenbedingungen sind bei der Entwicklung von Energieaufwand und CO₂-Emissionen einige Tendenzen zu erwarten.

Auf Grund der zu Ähnlichkeiten ist eine getrennte Betrachtung von Europa und Deutschland nicht sinnvoll. Nur bei gegenläufigen Entwicklungen wird im Folgenden darauf verwiesen. Insgesamt sind im Verkehrssektor unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit 4 Haupttendenzen zu erwarten, welche im folgenden dargestellt werden.

4.3.1 Allgemeine Entwicklung

Die Bevölkerungsentwicklung ist innerhalb der Europäischen Union (EU-28) sehr unterschiedlich. Insgesamt ist aber ein jährlicher Bevölkerungszuwachs zu verzeichnen. Eine auch in Zukunft schwer abzuschätzende Größe ist die Zuwanderung³⁰. Im Bezug auf die Bevölkerungsstruktur und das -alter sind in den letzten Jahren deutliche Trends festzustellen. Auch wenn erneut regionale Unterschiede bestehen, altert die Bevölkerung der EU insgesamt. Die Geburtenraten sind niedrig, die Lebenserwartung steigt und insgesamt verschiebt sich die Altersstruktur Richtung der sogenannten „Zwiebelform“³¹. Für Deutschland hat das Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung im Rahmen des BVWP verschiedene demografische Daten

³⁰vgl. EUROSTAT (2015b), online

³¹vgl. EUROSTAT (2015a), online

erhoben und abgeschätzt. Es wird erwartet, dass die Einwohnerzahl in Deutschland um rund 2 % abnehmen wird, was einer Einwohnerzahl von 78,2 Mio im Jahr 2030 entspricht. Insbesondere die Anzahl an Personen im Alter von 18-64 Jahren werden anteilig zurückgehen und die Anzahl von Einwohnern über 65 Jahre stark zu nehmen. Analog zur europäischen Entwicklung ist auch in Deutschland eine starke Alterung der Bevölkerung zu erwarten³². Weiterhin wächst das Bruttoinlandsprodukt (BIP) laut ifo Institut Niederlassung Dresden und der Hamburger Helmut-Schmidt-Universität bis 2030 ca. 1,14 % pro Jahr. Das ist ein moderater Zuwachs und vor allem durch die veränderte Altersstruktur und damit den Rückgang der Erwerbstätigen begründet³³.

Im Verkehrssektor sind europaweit sowohl für den Güter- als auch für den Personenverkehr Zuwächse zu erwarten. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 beschreibt für Deutschland ebenfalls ein starkes Verkehrswachstum. Die Verkehrsleistung im Personenverkehr soll bis 2030 gegenüber 2010 um 12,2 % steigen. Grund für diese Zunahme ist, vor allem eine höhere Automobilität der Gesellschaft. Die einzelnen Veränderungen sind der Tabelle 4.3 zu entnehmen. Der öffentliche Straßenpersonenverkehr schließt die Fernbuslinien mit ein. Am stärksten soll im betrachteten Zeitraum der Luftverkehr wachsen.

Personenverkehr [Mrd. Pkm]	2030	Zuwachs vgl. mit 2010 [%]
MIV	991,8	9,9
Eisenbahn	100,1	19,2
Öffentlicher Straßenpersonenverkehr	82,8	6,0
Luft	87,0	64,8

Tabelle 4.3: Entwicklung Transportleistung im Personenverkehr nach [BMVI (2016b) S. 57]

Im Güterverkehr geht man sogar von einer Steigerung um 38 % aus. Gründe für Güterverkehrswachstum sind die Zunahme des internationaler Handels sowie der Anstieg von grenzüberschreitendem, Transit- und Binnenverkehr. Die Bahn hat prognostisch den stärksten Zuwachs (43 %) zu verzeichnen. Die genauen Zahlen sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Grund für das überproportionale Wachstum des Bahnanteils ist der zu erwartende Zuwachs an Kombinierten Verkehr³⁴.

Güterverkehr [Mrd. tkm]	2030	Zuwachs vgl. mit 2010 [%]
Eisenbahn	153,7	42,9
Straße	607,4	38,9
Binnenschiff	76,5	22,8

Tabelle 4.4: Entwicklung Transportleistung im Güterverkehr nach [BMVI (2016b) S. 56-57]

³²vgl. BMVI (2016b) S. 55

³³vgl. BERLEMANN ET AL. (2014) S. 34-43

³⁴vgl. BMVI (2016b) S. 55-57

4.3.2 Elektrifizierung

Bei Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen liegt der Wirkungsgrad bei lediglich rund 25 %. Weiterhin haben sie den Nachteil, dass sie nicht immer optimal betrieben werden können beispielsweise beim Anfahren. Elektromotoren hingegen erreichen Wirkungsgrade bis zu 90 %. Diese Unterschiede im Wirkungsgrad deuten bereits an, dass enormes Potenzial in der Elektrifizierung des Mobilitätssektors besteht. Natürlich ist immer zu berücksichtigen, wie die elektrische Energie erzeugt wird. Beim Einsatz von fossiler und nuklearer Energie ist die Reduktion des Primärenergieaufwands marginal, da die Abwärmeverluste die Ausnutzung begrenzen.

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass wohl nicht der gesamte Verkehrsbereich elektrifiziert werden kann. Im Gütertransport sind auch längerfristig noch Verbrennungsantriebe zu erwarten, insbesondere im Luft- und Schiffsverkehr. Im Güterverkehr sind 2 Ansätze für den Umstieg auf elektrisch betriebene Mittel von Bedeutung. Zum einem die Verlagerung von der Straße auf die Schiene und zum anderen der Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Letzteres könnte beispielsweise durch Oberleitungs-Lkws realisiert werden.

Im Bereich des Personenverkehrs liegt das größte Potenzial im Einsatz von Elektromotoren. Trotz einiger technischer Herausforderungen sind wenig Hindernisse zu erkennen. Hohe Investitionen in die Infrastruktur sind nicht nötig. Außerdem ist davon auszugehen, dass kurzfristig verstärkt Hybridfahrzeuge dominieren. Ein Großteil der alltäglichen Pkw-Nutzung entsteht durch Kurzstreckenfahrten, sodass ein Großteil des MIV durch Hybridfahrzeuge elektrisch abgewickelt werden würde.

Wie schnell die Elektrifizierung tatsächlich umgesetzt wird ist von mehreren Faktoren abhängig.

- Batterietechnik

Die Herausforderungen sind das Erreichen von hoher Energiedichte, Zyklenzahl und Reichweite bei geringem Gewicht, Kosten und Kapazitätsverlust³⁵. Laut STAN sind die Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Batterien begrenzt und deshalb ist die langfristig die Elektromobilität keine alternative für große Reichweiten. Jedoch ist ein Einsatz im städtischen Verkehr sinnvoll³⁶. Dazu laufen in verschiedenen deutschen Großstädten bereits Pilotprojekte³⁷.

- Sicherheit

- Mobilitätsversorgung

Es wird diskutiert ob Elektrofahrzeuge ebenfalls als Universaltransportmittel eingesetzt werden oder ob andere Verkehrsträger Funktionen übernehmen.

- Umweltbedingungen

Der Effizienzgewinn kann stark reduziert werden, falls auf Grund der Außentemperaturen, zusätzliche Heizenergie benötigt wird. Weiterhin müssen Elektromotoren, im Gegensatz zu

³⁵ vgl. GÜNTHER (2014) S. 103-108

³⁶ vgl. STAN (2015) S. 292-293

³⁷ z. B. Elektrobuse: VHH, KVB, BVE; Hybridbuse: LVB, DVB, MVG

Verbrennungsmotoren, bei kalter Witterung beheizt werden³⁸.

Abschließend ist festzuhalten, dass besonders Kurzstrecken für die Elektromobilität interessant sind. Insbesondere die Elektrifizierung des Individualverkehrs birgt ein großes Potenzial. Bei einer positiven Entwicklung des Elektroanteils sind, bezogen auf Energieaufwand und Emissionen, große Einsparungen zu erwarten.

4.3.3 Erneuerbarer Energien und alternative Kraftstoffe

Eine weitere zu erwartende Tendenz ist der Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energien. Die CO₂-Emissionen von Strom aus erneuerbaren Energien sind deutlich geringer als die Emissionen der Stromgewinnung auf Basis von fossilen Energieträgern. Sowohl in Europa als auch in Deutschland wird der Ausbau politisch unterstützt (vgl. Kapitel Aktuelle Umwelt- und Verkehrspolitik). Zu betonen ist, dass eine Elektrifizierung des Verkehrssektors nicht zwingend an Strom aus erneuerbaren Energiequellen gekoppelt ist. Allerdings ist dies im Hinblick auf eine Emissionsreduktion äußerst sinnvoll. Die Möglichkeiten einer Erhöhung des Elektroanteils im Verkehrssektor wurden bereits dargestellt (siehe Kapitel 4.3.2). Im Verkehrssektor sollten auch die alternativen Kraftstoffe berücksichtigt werden.

Eine verstärkte Nutzung von alternativen Kraftstoffen ist laut mehreren Studien unabhängig von der Entwicklung des Erdöl- und Erdgasmarktes anzunehmen. Auch soll sich langfristig die Wärmekraftmaschine im Automobilbereich durchsetzen. Die Verwendung alternativer Kraftstoffe hängt auch von den physikalischen Eigenschaften bei der Nutzung ab³⁹. Andere Faktoren wie Ressourcenverfügbarkeit und technische Umsetzung sind beispielsweise für den MIV politisch zu unterstützen. Im Jahr 2009 haben sich verschiedene Luftfahrtgesellschaften, Hersteller und Flughäfen auf spezielle Klimaziele für den Luftverkehr geeinigt. So soll bspw. ab dem Jahr 2020 das Wachstum des Luftverkehrs CO₂-neutral erfolgen. Diese Ziele sollen mit Hilfe einer Vier-Säulen-Strategie erreicht werden. Diese vier Säulen bestehen grob zusammengefasst aus der technischer Innovation und Effizienzsteigerung, dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen, der Förderung von politisches Engagement und der Nutzung des Emissionshandels⁴⁰ (siehe Kapitel 5.1). Langfristig ist also eine positive Entwicklung im Bezug auf die Emissionen zu erwarten. Im Schienenverkehr ist EU-weit mit einem Verkehrsleistungszuwachs von rund 70 % bis zum Jahr 2025 zu rechnen⁴¹. Mit Hinblick auf die Emissionen bedeutet dies eine enorme Reduktion, da in Deutschland die Deutsche Bahn bis 2050 CO₂-neutral fahren möchte⁴². Der Einsatz von alternativen Kraftstoffen wirkt sich positiv auf die Emissionen aus.

³⁸vgl. GÜNTHER (2014) S. 103-108

³⁹vgl. STAN (2015) S. 202

⁴⁰vgl. BDL (2015) S. 8-9

⁴¹vgl. VDV (2016)

⁴²vgl. DEUTSCHE BAHN BDEW (2015), online

4.3.4 Effizienzsteigerung

In allen Bereichen wird kontinuierlich an einer Effizienzsteigerung gearbeitet. Laut GÜNTHER lässt sich beispielsweise die Effizienz von Elektroautos enorm steigern, wenn die elektrische Energie statt über Wärmekraftmaschinen direkt erzeugt wird. Durch den Einsatz von Elektromotoren kann so eine Effizienzsteigerung um rund den Faktor 3 erreicht werden. Ein weiterer Effizienzgewinn bei Elektrofahrzeugen kann durch die Rückspeisewirkung beim Bremsvorgang entstehen. Sogenanntes rekuperatives Bremsen ist auch in einer elektrischen Version mit geringen Mehraufwand und -gewicht möglich⁴³.

Neben der technischen Seite werden auch Möglichkeiten durch ein verbessertes Management berücksichtigt. Um die Auswirkungen des Güterverkehrs zu verringern, werden EU-weit verschiedene Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung untersucht. Insbesondere die Verlagerung des Gütertransports auf die Schiene oder den Wasserweg. Jedoch gibt es verschiedene Umsetzungshindernisse insbesondere bei der Verkehrsverlagerung. Der Straßengüterverkehr über 300 km soll laut Weissbuch der EU bis 2030 zu 30% beziehungsweise bis 2050 zu 50% auf den Eisenbahn- oder den Schiffsverkehr verlagert werden. Das Erreichen der Zielstellung soll mit Hilfe von umweltfreundlichen und effizienten Güterverkehrskorridoren erleichtert werden⁴⁴. Weiterhin laufen Untersuchungen zur Steigerung der Logistik im Rahmen des betriebliche Umweltmanagements oder überbetrieblich mittels Frachtbörsen und verschiedenen City-Logistik-Modellen. Unternehmensentscheidungen, wie etwa die Standortwahl, können mit Hilfe guter Stadtplanung beeinflusst werden und so zur Vermeidung hoher Transportkosten führen⁴⁵.

4.3.5 Fazit

Zusammenfassend ist anzunehmen, dass:

- die Bevölkerungszahl sinkt,
- die Anzahl der Erwerbstätige fällt,
- das Durchschnittsalter steigt,
- der Personen- und der Güterverkehr zunehmen,
- die Elektrifizierung im Verkehrssektor steigt,
- die Verwendung alternativer Kraftstoffe zunimmt und
- die Effizienz steigt.

Es ist festzustellen, dass während im Allgemeinen der Energieaufwand vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden konnte, das im Verkehrssektor nicht so ist. Die Transportintensität

⁴³vgl. GÜNTHER (2014) S. 103-108

⁴⁴vgl. WISSENSCHAFTLICHE BEIRAT BEIM BUNDEMINISTERIUM FÜR VERKEHR (2013) S. 11-14

⁴⁵vgl. UMWELTBUNDESAMT (2015a) S. 106-107

stieg beispielsweise auch während der Wirtschaftskrise weiter an. Zwar zeigen alle Verkehrsmittel Effizienzsteigerungen, doch gleichzeitig steigen Anzahl und Entfernung der transportierten Personen bzw. Güter. Eine Trendwende bei Energieaufwand und Treibhausgasemissionen des Verkehrs ist daher bisher kaum zu erkennen. Der erneuerbare Stromverbrauch im Verkehrssektor ist äußerst beschränkt. Gleichzeitig ist der Einsatz von Biokraftstoffen hinsichtlich der verfügbaren Potenziale de facto gedeckelt. Die überschaubaren Fortschritte durch technische Effizienzsteigerungen und Verkehrsverlagerungen werden vom deutlich höheren Zuwachs des Verkehrsaufkommens kompensiert⁴⁶.

Ob und wie sich der Energieaufwand im Verkehrssektor ändern ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die hier schwer abgeschätzt werden können. Es ist anzunehmen, dass mit Hilfe von gesetzlichen Regelungen und der Subvention von alternativen Technologien das Ablösen von fossilen Kraftstoffen beschleunigt wird. Diese Entwicklung hat aber keinen Einfluss auf die Mobilität. Dass die Mobilität in Zukunft stark sinkt, ist nicht anzunehmen. Hier ist der Zielkonflikt zwischen dem Erhalt bzw. Sicherstellung von Mobilität und der umweltschonenden Realisierung dieser zu berücksichtigen. Insbesondere ist zu bedenken, dass Effizienzgewinne nur wirken, wenn sie nicht durch eine starke Zunahme des Verkehrsaufkommens ausgeglichen werden. Dies bedeutet, dass eine Reduktion der CO₂-Emissionen bis zu einem gewissen Grad angenommen werden kann, auch wenn der Energieaufwand konstant bleibt bzw. nur marginal sinkt.

⁴⁶vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014)S. 62

5 Aktuelle Umwelt- und Verkehrspolitik

Im folgenden Kapitel werden die Umweltpolitik und die Verkehrspolitik in Europa und Deutschland dargestellt. Der Fokus liegt auf der aktuellen Politik zwischen 2010 und 2016. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Energiewende in Deutschland.

5.1 Umweltpolitik

Klima und Temperatur der Erde werden durch die Menschheit beeinflusst - in welchem Ausmaß ist umstritten. Die Nutzung fossiler Brennstoffe, das Abholzen von Regenwäldern und die Viehzucht führen zu einem enormen Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre und damit zu einem verstärkten Treibhauseffekt und letztendlich zur Erderwärmung. Laut wissenschaftlichen Untersuchungen ist eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 2°C der Schwellenwert für irreversible Veränderungen der Umwelt. Aus diesem Grund versucht die EU ihre Emissionen dementsprechend zu reduzieren, so dass eine Erderwärmung von 2°C vermieden wird.

5.1.1 Europa

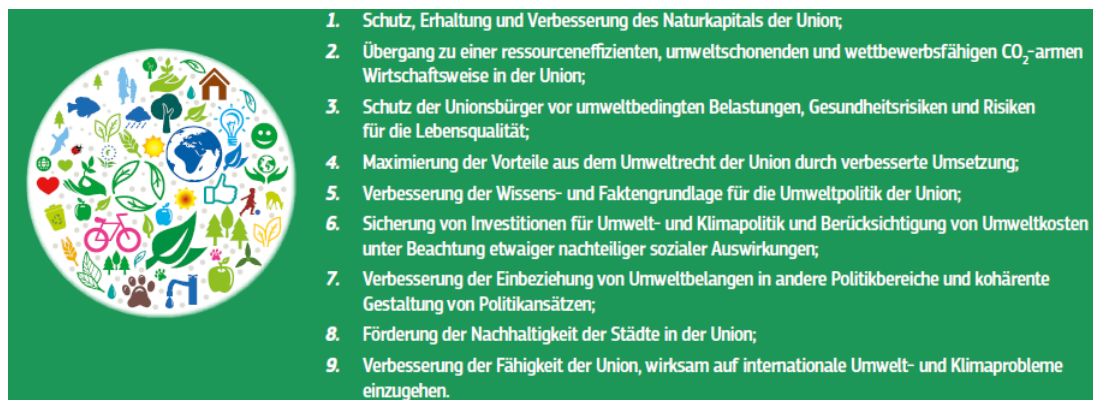


Abbildung 5.1: Ziele europäische Umweltpolitik [EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014a) S. 2]

Ziel der EU ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen der gesamten Wirtschaft um 80-95 %. Dies bedeutet, dass der Wirtschaft eine fast vollständige Dekarbonisierung gelingen müsste¹. Die Europäische Union hat 2013 ein Umweltaktionsprogramm beschlossen, welches bis 2020 läuft und sich langfristig auf 2050 bezieht. Insgesamt umfasst es neun Ziele (siehe Abbildung 5.1)².

Im Rahmen dieser Arbeit soll vor allem der zweite Handlungsbereich genauer erläutert werden. Von der Europäischen Kommission wurden ein Rechtspaket mit aufeinander aufbauenden Zielen

¹vgl. WISSENSCHAFTLICHE BEIRAT BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (2013) S. 7

²vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014a) S. 1-3

für die Jahre 2020 und 2050 verabschiedet. Die in diesem Klima- und Energiepaket enthaltenen Ziele bzw. Maßnahmen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Reduktion Treibhausgasemissionen und Lastenverteilung (Entscheidung Nr. 406/2009/EG)

Diese Entscheidung Nr. 406/2009/EG des europäischen Parlaments vom April 2009 legt die Ziele der Mitgliedsstaaten zur Reduktion der Treibhausgase fest. Die Lastenverteilung, auch Effort Sharing genannt, beschreibt die individuelle Zielvorgabe der Reduktion jedes Mitgliedslandes. Je nach Land und damit individuellem Stand schwanken die Ziele sehr. Insgesamt sollen folgende Ziele in der Europäischen Union erreicht werden:

- 2020: Reduktion Treibhausgase um 20-30 %
- 2050: Reduktion Treibhausgase um 60-80 %³

Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG)

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) umfasst die allgemeine Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien und die verschiedenen Zielwerte der einzelnen Länder.

Richtlinie zur Geologische Speicherung von CO₂ (2009/31/EG)

Diese Richtlinie zur Geologische Speicherung von CO₂ (2009/31/EG) stellt den Rechtsrahmen für CO₂-Abscheidung und Speicherung dar.

Richtlinie zur Überarbeitung des EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS)

Der Emissionshandel, ein sogenannter Kyo-Mechanismus, ist ein wichtiges Instrument zur Senkung der Treibhausgasemissionen, insbesondere für Kraftwerke, Industrie und Luftverkehr. Er wurde 2005 in der EU eingeführt. Darunter zu verstehen ist der Handel mit den Rechten zum Ausstoß einer bestimmten Menge Treibhausgas. Dazu werden die Treibhausgas-Emissionen von handelspflichtigen Anlagen auf eine bestimmte Menge begrenzt. Um Treibhausgase emittieren zu dürfen, müssen Berechtigungen vorliegen. Das bedeutet, je weniger Emissionen ausgestoßen werden, desto wirtschaftlicher ist dies für ein Unternehmen. Die Einnahmen sollen für den Klimaschutz eingesetzt werden⁴.

Durch den Emissionshandel werden ungefähr 40% der Emissionen an Treibhausgasen abgedeckt. Seit 2013 gilt der Emissionshandel neben Kraftwerken und Industrieanlagen auch für Stromerzeuger. Allerdings unterliegen die ebenfalls stark emittierenden Sektoren wie Verkehr, Landwirtschaft und Gebäude diesem nicht⁵.

³vgl.406/2009/EG (2009) Abs. 1, Abs. 4

⁴vgl.EUROPÄISCHE KOMMISSION (2013) S. 2-4

⁵vgl.EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015), online

Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050

Wie bereits erläutert ist die Senkung des Ausstoßes von Treibhausgasen von enormer Bedeutung und nur durch langfristige Maßnahmen umzusetzen. Aus diesem Grund formuliert die EU verschiedene Etappenziele, um bis 2050 den Übergang zu einer CO₂-freien Wirtschaft umzusetzen. Die Zwischenziele sind:

- bis 2030 Emissionsverringerung um 40 %
- bis 2040 Emissionsverringerung um 60 %

Der Fahrplan soll in Kombination mit dem Energiefahrplan und dem Weißbuch für den Verkehr zum Erfolg führen.

Diese Ziele können nur durch das Mitwirken aller Sektoren ermöglicht werden. Abbildung 5.2 zeigt, welche Emissionssenkungen in den einzelnen Sektoren möglich sind⁶.

THG-Emissionsverringerung gegenüber 1990	2005	2030	2050
Insgesamt	-7 %	-40 bis -44 %	-79 bis -82 %
Sektoren			
Stromerzeugung (CO ₂)	-7 %	-54 bis -68 %	-93 bis -99 %
Industrie (CO ₂)	-20 %	-34 bis -40 %	-83 bis -87 %
Verkehr (einschl. CO ₂ aus der Luftfahrt, ohne Seeverkehr)	+30 %	+20 bis -9 %	-54 bis -67 %
Wohnen und Dienstleistungen (CO ₂)	-12 %	-37 bis -53 %	-88 bis -91 %
Landwirtschaft (Nicht-CO ₂)	-20 %	-36 bis -37 %	-42 bis -49 %
Andere Nicht-CO ₂ -Emissionen	-30 %	-72 bis -73 %	-70 bis -78 %

Abbildung 5.2: Emissionssenkungspotenzial EU [EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011b) S. 6]

Für den Sektor Verkehr werden im Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft ebenfalls Einsparpotenziale sowie Maßnahmen zur Emissionsreduktion genannt (siehe Kapitel 5.2).

Der Fahrplan für eine CO₂-freie Wirtschaft benennt Ziele für Gebäude, Industrie und Landwirtschaft.

- Gebäude – Emissionssenkung um ca. 90 %
- Industrie – 80 %
- Landwirtschaft – Ein Anstieg der Emissionen ist zu erwarten, aufgrund steigender Nachfrage an Nahrungsmittelproduktion bis 2050.

In allen Bereichen sind diese Ziele nur möglich durch Effizienzsteigerung, saubere Technologien, kohlenstoffarme bzw. -lose Energieträger, also Investitionen⁷.

⁶vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011b) S. 4-6

⁷vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011b) S. 8-11

Energiefahrplan 2050

Im Jahr 2011 verabschiedete die Europäische Kommission, ergänzend zu den bereits genannten Papieren, den sogenannten Energiefahrplan 2050, welcher ebenfalls auf eine Reduzierung der CO₂-Emissionen abzielt. In dem Fahrplan werden mehrere Szenarien zur Treibhausgasreduktion im Energiesektor untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Umstieg auf eine CO₂-arme Wirtschaft möglich ist. Der Energiesektor bietet das größte Reduktionspotenzial. Bis 2050 könnte der Sektor, durch den Umstieg auf erneuerbare Quellen, fast vollständig CO₂-frei sein. So können die fossilen Brennstoffe sowohl im Verkehr als auch im Wärmesektor anteilig durch Strom substituiert werden⁸. Die Verringerung der Emissionen um 80 % (gegenüber 1990) bis 2050 soll laut Fahrplan überwiegend durch einheimische Emissionsreduktion statt durch internationale Gutschriften ermöglicht werden. Die EU-Staats- und Regierungschefs haben sich zu einer entsprechenden Senkung verpflichtet (siehe ⁹).

Weiterhin sind eine Verordnung zur CO₂-Senkung im Bereich des Personenkraftwagenverkehrs und die Kraftstoffqualitätsrichtlinie zu erwähnen¹⁰.

5.1.2 Deutschland

Die Umweltpolitik in Deutschland ist stark mit dem europäischen Rahmen verknüpft. Im Folgenden werden relevante Besonderheiten der deutschen Umweltpolitik dargestellt.

Auf nationaler Ebene wird die bereits genannte Richtlinie 2009/28/EG der EU durch das Energiekonzept der Bundesregierung und den Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energien umgesetzt.

Die oben erwähnten europäischen Rechte zur Speicherung bzw. Abscheidung von CO₂ werden durch nationale CCS-Gesetze begrenzt. So verhindern diese eine großskalig angelegte Speicherung¹¹.

Energiekonzept

Ziel dieses 2010 vorgelegten Energiekonzepts ist es, eine aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht nachhaltige Energieversorgung sowie die Versorgungssicherheit zu ermöglichen. Diese Strategie umfasst Entwicklungen und Maßnahmen bis 2050 und leitet daraus die neun folgenden Handlungsfelder ab:

- „1. Erneuerbare Energien als eine tragende Säule zukünftiger Energieversorgung
2. Schlüsselfrage Energieeffizienz
3. Kernenergie und fossile Kraftwerke
4. Leistungsfähige Netzinfrastruktur für Strom und Integration erneuerbarer Energien
5. Energetische Gebäudesanierung und energieeffizientes Bauen

⁸vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011a) S. 6-20

⁹vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016), online

¹⁰vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015), online

¹¹vgl. WIETSCHER ET AL. (2015) S. 89

6. Herausforderung Mobilität
7. Energieforschung für Innovationen und neue Technologien
8. Energieversorgung im europäischen und internationalen Kontext
9. Akzeptanz und Transparenz”¹²

In diesem Energiekonzept werden energiepolitische Ziele für Deutschland genannt, welche weiter als die im europäisch Rahmen festgeschriebenen Ziele gehen (siehe Tabelle 5.1).

Bereich	Vergleichsjahr	2020	2030	2040	2050
Senkung Emission klimaschädlicher Treibhausgase	1990	40%	55%	70%	80-90%
Senkung Primärenergieverbrauch		20%			50%
Senkung Verbrauch elektrischer Energie	2008	10%			25%
Senkung Wärmebedarf von Gebäuden	2008	20%			
Erhöhung Anteil erneuerbare Energien am Bruttoendenergieverbrauch		18%	30%	45%	
Erhöhung Anteil erneuerbare Energien am Bruttostromverbrauch		35%	50%	65%	80%

Tabelle 5.1: Ziele Energiekonzept nach [BMWI & BMU (2010) S. 5]

Nach der Katastrophe des Atomkraftwerks in Fukushima im Jahr 2011 beschloss die Bundesregierung sechs Gesetze (AtG, EEG, EnWGÄndG, NABEG, EKFG, BauGB) welche die sogenannte Energiewende einleiten sollen¹³. Deutlich zu erkennen ist, dass die Schwerpunkte auf dem Einsatz von erneuerbaren Primärenergien, der Energieeffizienz sowie der Entwicklung der Netze liegen. Die wesentlichen gesetzlichen Grundlagen zur Umsetzung sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz.

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das EEG ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende im Stromsektor, da es die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen fördert. Es wurde 2000 verabschiedet und seit dem mehrfach überarbeitet. Die momentan gültige Fassung ist das EEG 2014. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz beruht auf zwei Prinzipien. Zum einem wird die überlassene Elektroenergie vergütet und zum anderen wird die Direktvermarktung prämiert. Die Netzbetreiber müssen den Strom aus erneuerbaren Quellen mit Vorrang abnehmen und den Strom nach festgelegten Vorgaben vergüten¹⁴. Diese Prinzipien bieten den Anlagenbetreibern Sicherheit und führten in der Vergangenheit zu einem starken Ausbau¹⁵. Das Gesetz umfasst alle Anlagen zur Nutzung von solaren Strahlungsenergien, d.h. in Deutschland fast ausschließlich Photovoltaik-, Windenergie, Biomasse, Deponiegas, Wasserkraft, Klärgas, Grubengas und Geothermie¹⁶. Die EEG-Umlage

¹²vgl. BMWI & BMU (2010) S. 2-4

¹³vgl. SCHEFFLER (2014) S. 3

¹⁴vgl. EEG (2014) Abs. 2, Abs. 3

¹⁵vgl. SCHEFFLER (2014) S. 5

¹⁶vgl. EEG (2014) Abs. 4

ist ein vom Endverbraucher zu zahlender Bestandteil des Strompreises zur Finanzierung des Umbaus¹⁷.

Die letzte Novelle des Gesetztes wurde im Juni 2016 beschlossen und die Änderungen werden ab Beginn des Jahres 2017 gelten. Die wichtigste Änderung ist, dass ein Ausschreibungssystem eingeführt wird (vgl. EEG (2016)). Laut BMWi werden damit 3 Ziele verfolgt:

- die Einhaltung des Ausbaurückbaus für erneuerbare Energien,
- die Realisierung des EEG mit möglichst geringen Kosten und
- Faire Chancen für alle Akteure¹⁸.

Somit ist mit dem EEG 2017 die Phase der Technologieförderung durch politisch bestimmte Preise abgeschlossen. Auf Grund des Umstiegs auf wettbewerbliche Ausschreibungen wird zukünftig die Vergütungshöhe für Strom aus erneuerbaren Energien über Auktionen ermittelt. Dadurch soll ein der Ausbau mit wettbewerblichen Preisen erreicht und eine Überförderung vermieden werden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erhaltung der Akteursvielfalt. Aus diesem Grund wurde der Begriff Bürgerenergiegesellschaften definiert und diese können nun unter vereinfachten Bedingungen an den Ausschreibungen teilnehmen. Ausgeschrieben wird die Vergütung für Windenergie, Photovoltaik und Biomasse. Wobei Anlagen kleiner 750 kW von der Regelung nicht betroffen sind¹⁹.

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugen sowohl Strom als auch Nutzwärme. Durch die gekoppelte Erzeugung werden sowohl Brennstoff als auch CO₂-Emissionen eingespart.

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz wurde 2002 beschlossen. Ähnlich zum EEG regelt das KWKG die bevorzugte Einspeisung und Vergütung von Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Ziel ist es, die Stromerzeugung aus der Kraft-Wärme-Kopplung zu erhöhen. Weiterhin regelt das KWKG die Vergütung des Stroms. Ähnlich wie beim EEG erhalten die Betreiber von testierten KWK-Anlagen in Deutschland eine Förderung. Diese Förderung wird auf den Stromverbrauch umgelegt.

Zu Beginn des Jahres 2016 ist eine Neufassung des KWKG in Kraft getreten. Die folgenden Neuerungen wurden vorgenommen:

- KWK-Zuschläge für den Eigenverbrauch entfallen weitestgehend
- ein Anstieg der Zuschläge für den eingespeisten KWK-Strom
- die Erdgasbestandsanlagen erhalten, zunächst für 4 Jahre, einen Zuschläge
- ein Direktvermarktungsgebot für Anlagen größer 100 kW elektrischer Leistung²⁰

¹⁷ vgl. EEG (2014) §60, §61

¹⁸ vgl. BMWI (2016b), online

¹⁹ vgl. BMWI (2016a), online

²⁰ vgl. KWKG (2016), online

5.1.3 Energiewende

In vielen Industriestaaten verändern sich die Energiewirtschaften stetig. In Deutschland wird auf Grundlage des Energiekonzeptes von 2011 sowie den zugehörigen Eckpunkten die Energieversorgung umgebaut. Ziel der sogenannten Energiewende ist die Schaffung einer energieeffizienten sowie umweltschonenden Volkswirtschaft. Das bedeutet zum einen die Reduktion des CO₂-Ausstoßes und zum anderen die Liberalisierung des Energiemarktes und damit den Ausstieg aus der Kernenergienutzung. Der Stromverbrauch soll laut Zielen der Bundesregierung im Jahr 2050 zu 80% durch erneuerbaren Energien abgedeckt werden. Der Begriff der Energiewende wird von der Bundesregierung mit folgendem konkreteren Schwerpunkten untermauert:

- „1. Zügiger Ausbau der erneuerbaren Energien
2. Integration der erneuerbaren Energien in das Energiegesamtsystem
3. Zentraler Baustein: Windenergie
4. Kosteneffizienz
5. Ausbau der Elektroenergienetze
6. Intelligente Elektroenergienetze und Speicher
7. Umbau des fossilen Kraftwerkparks
8. Energieeffiziente Gebäude
9. Effiziente Beschaffung
10. Europäische Initiativen für Energieeffizienz
11. Monitoring²¹“

Für die aktuelle Legislaturperiode wurde eine 10-Punkte-Energie Agenda beschlossen. Die einzelnen Bestandteile so wie der aktuelle Stand können der Abbildung 5.3 entnommen werden. Auf der linken Seite der Abbildung sind die einzelnen Punkte der Agenda dargestellt.

Laut der Bilanz der Bundesregierung im Jahr 2015 schreitet der Umbau voran und es konnten bereits mehrere Erfolge verbucht werden. Dazu zählen im Bereich der erneuerbaren Energien die Erhöhung des Anteils am Endenergieverbrauch auf 12,4 %, die Vermeidung von 148 Mio. t Treibhausgasemissionen und die Senkung der Importe fossiler Energieträger²². Durch die am 8. Juli 2016 beschlossenen Gesetzesvorhaben wird laut BMWi „ein neues Kapitel“ aufgeschlagen. Das Gesetzes-Paket besteht aus dem bereits genannten Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017, dem Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes und dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende.

Das Strommarktgesetz soll den Strommarkt an die flexible Energieerzeugung und -nachfrage anpassen. Gleichzeitig soll es aber die Versorgung sicherstellen. Außerdem werden laut Gesetz 13 % der Braunkohlekapazitäten erst in eine Sicherheitsbereitschaft und anschließend in die Stilllegung überführt.

²¹vgl. SCHEFFLER (2014) S. 4

²²vgl. PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (2015) S. 2

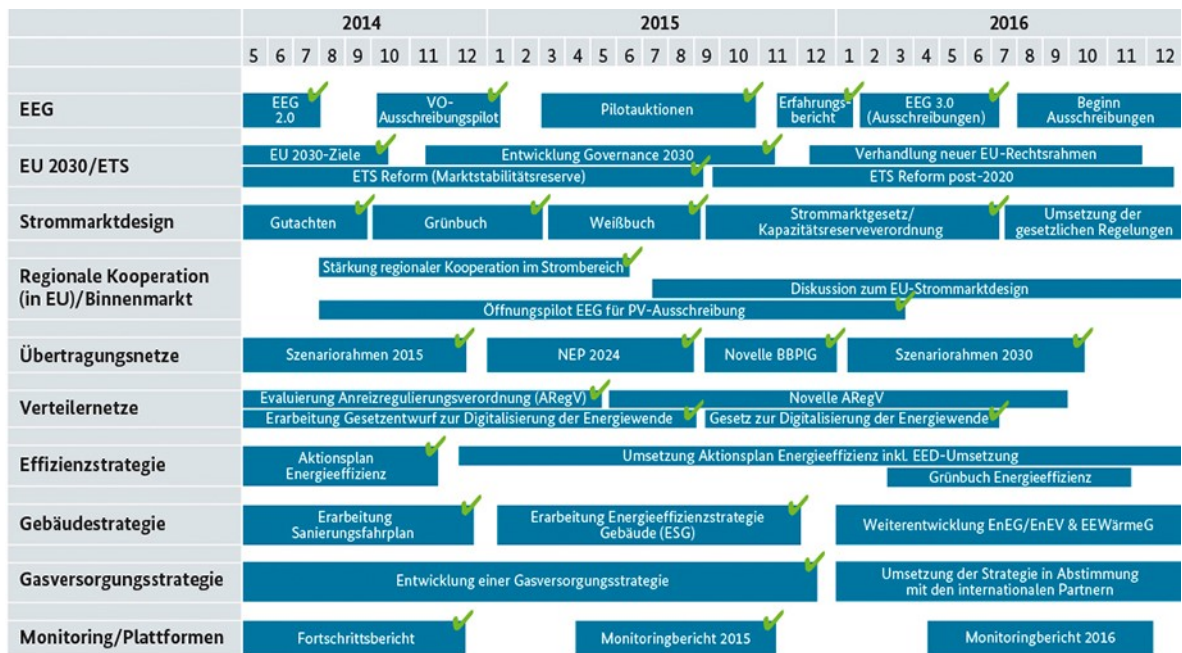


Abbildung 5.3: 10-Punkte-Energie Agenda [BMWI (2016a), online]

Das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende führt langfristig vor allem intelligente Messsysteme ein, um das Versorgungssystem energiewendegerecht umzubauen²³.

²³vgl. BMWI (2016a), online

5.2 Verkehrspolitik

Im Folgenden wird zu Beginn die Verkehrspolitik der Europäischen Union vorgestellt. Anschließend folgt die Darstellung der aktuellen Verkehrspolitik in Deutschland.

5.2.1 Europa

Das Hauptziel der übergreifenden europäischen Verkehrspolitik ist die Schaffung eines einheitlichen Verkehrsraums. Für dieses Ziel sind mehrere Rechtsvorschriften in der EU im Bereich Verkehr relevant. Wichtige Rechtsvorschriften sind die drei Eisenbahnpakete, die „Kabotage“-Gesetze für den Güterverkehr auf Straße und See und zwei Verordnungen für einen einheitlichen europäischen Luftraum²⁴.

Eine ausführliche Darstellung der gesamten Infrastrukturmaßnahmen würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Jedoch sollen im Folgenden kurz wichtige Eckpunkte genannt werden. Momentan ist die Verkehrsinfrastruktur in Europa inhomogen. Dies drückt sich bspw. durch uneinheitliche Beschilderung oder unterschiedliche Spurweiten aus. Aus diesem Grund soll mithilfe des Projekts TEN-V langfristig ein transeuropäisches Netz geschaffen werden. Bis zum Jahr 2030 wird ein Kernnetz errichtet, welches vor allem eine Sicherstellung der grenzüberschreitenden Verbindungen und eine Modernisierung des Verkehrsnetzes berücksichtigt. Als Zubringer zu diesem Kernnetz dient ein gut ausgebautes Straßennetz. Das Ziel bis 2050 ist, dass die Mehrheit der Bürger zum Erreichen des Netzes maximal 30 Minuten Fahrzeit benötigen²⁵.

Im Jahr 1992 wurde ein Weißbuch zur Verkehrspolitik von der europäischen Kommission beschlossen. In diesem werden die Bedeutung nachhaltiger Mobilität sowie der Öffnung der Märkte betont. Auf Grund der Entwicklungen wurden in den Jahren 2001 sowie 2011 Folge-Bücher vorgelegt. Im folgenden werden Besonderheiten der einzelnen Verkehrsträger sowie das Weißbuch vorgestellt.

Weißbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum

Das Weißbuch der Europäischen Kommission KOM (März 2011) formuliert verkehrs-, umwelt- und energiepolitische Ziele sowie mehrere Handlungsstrategien zum Erreichen dieser. Der Anhang des Weißbuchs nennt verschiedene Anpassungs- und Transformationsmaßnahmen.

Das Weißbuch „Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum“ von 2011 enthält unter anderem folgende Maßnahmen:

- die Reduktion der Kohlenstoffdioxid-Emissionen des Verkehrs um 20 % bis 2030 (Vergleichsjahr 2008) beziehungsweise um 60% bis 2050 (Vergleichsjahr Jahr 1990),

²⁴vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 6

²⁵vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 5

- den Aufbau von integrierten Verkehrsnetzen um verschiedene Verkehrsmittel und -träger zu verflechten,
- die Schaffung von multimodalen Hubs (auch als „Knotenpunkt“ bezeichnet) und damit verbunden die Beseitigung von technischen, administrativen und kapazitären Engpässen,
- die Verbesserung der Infrastruktur, insbesondere in Ländern, welche erst nach 2004 in die EU eingetreten sind und
- die Investitionen in eine vom Erdöl unabhängige Zukunft und Erfüllen der Dekarbonisierungsziele ohne Mobilitätsverlust²⁶.

In Summe werden 10 Ziele formuliert, welche „für ein wettbewerbsorientiertes und ressourcenschonendes Verkehrssystem sowie eine Reduktion der Treibhausgasemissionen“ umgesetzt werden sollen. Für alle Verkehrsträger gilt, dass bis 2050 ein EU-weites TEN-V Kernnetz mit entsprechende Informationsdiensten realisiert werden soll. Sicherzustellen ist außerdem die Anbindung aller wichtigen Anschlüsse an das Kernnetz. Bis zum Jahr 2020 soll ein Rahmen für ein multimodales Verkehrsinformations-, Management- und Zahlssystem geschaffen werden²⁷. Allerdings besteht ein Zielkonflikt zwischen der gleichzeitige Gewährleistung von nachfragebezogener uneingeschränkte Mobilität und dem Erreichen der Klimaziele. Der Wissenschaftliche Beirat beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung lobt das Papier, stellt aber auch die Frage ob der Zielkonflikt gelöst werden kann²⁸.

Verkehrsträger Straße

In Europa ist der Verkehrsträger Straße derjenige, über den am meisten Passagier- und Frachtverkehr abgewickelt wird. Das Verkehrsaufkommen auf der Straße ist in den letzten Jahren stetig gewachsen.

Laut Energiefahrplan soll im Verkehrssektor auf effizientere Fahrzeuge und Anreize zur Verhaltensänderung gesetzt werden. Weiterhin soll ein Mix an alternativen Kraftstoffen eingesetzt werden. Biokraftstoffe sind die Hautoption für den Langstreckengüterverkehr²⁹.

Auch das Weißbuch formuliert konkrete Ziele für den Verkehrsträger Straße. Die Anzahl an Pkw, welche mit konventionellen Kraftstoff betrieben werden, soll bis 2030 halbiert und 20 Jahre später vollkommen abgeschafft werden³⁰. Mit Hinblick auf die Klimaschutzziele der EU gab die Autoindustrie bereits 1990 eine Selbstverpflichtung zu Emissionsgrenzwerten der Motoren ab, welche aber nicht eingehalten wurden. Aus diesem Grund setzte die EU-Kommission verbindliche **Flottengrenzwerte** fest. Beispielsweise galt für neu zugelassene Pkw zwischen 2012 bis 2015 ein Grenzwert von maximal 130 g CO₂/km. Bis 2020 wird der Grenzwert auf

²⁶vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 5

²⁷vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

²⁸vgl. WISSENSCHAFTLICHE BEIRAT BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (2013) S. 5-6

²⁹vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011a) S. 13

³⁰vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

95 g CO₂/km gesenkt. Diese Grenzwerte führen dazu, dass die Hersteller sparsamere Motoren entwickeln müssen. Weiterhin werden langfristig die energieeffizienten Fahrzeuge zunehmen³¹.

Außerdem wird laut Weißbuch bis 2030 eine CO₂-freie Stadtlogistik angestrebt. Zur umweltfreundlicheren Abwicklung sollen bis zum Jahr 2030 30 % des Straßengüterverkehrs auf die Schiene verlagert werden und bis 2050 50 %³².

Ein weiterer Schwerpunkt der europäischen Verkehrspolitik ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit. In der Entwicklung ist ein deutlicher Rückgang der Todesfälle im Straßenverkehr zu erkennen. Jedoch schwanken die Unfallraten stark je nach Land. Das sogenannte Aktionsprogramm Straßenverkehrssicherheit der Europäischen Kommission möchte die Anzahl der Verkehrstoten bis 2020 halbieren. Daher werden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung durchgeführt, wie beispielsweise die Förderung von Technologien, die Optimierung von Notfall- und Rettungsdiensten oder die Erhöhung der Sicherheitsanforderungen³³. Dies korrespondiert mit den Zielen des Weißbuchs, welches die Anzahl der Unfalltoten bis 2050 auf nahezu Null senken möchte³⁴.

Verkehrsträger Schiene

Auf Grund der historischen Entwicklung gibt es in Europa ein stark fragmentiertes Eisenbahnsystem. Je nach Land unterscheiden sich Standards, Bahnstromnetze, Spurweiten und Signalsysteme. Der erste Reformschritt fand 1991 statt, bei dem die sogenannten drei Eisenbahnpakete für eine Liberalisierung des Schienenverkehrs sorgten. Allerdings konnten sich auf Grund verschiedener Faktoren wie beispielsweise Preis, Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit der Verkehr auf der Schiene nicht wie gewünscht entwickeln. Aus diesem Grund forcierte die Europäische Kommission 2014 ein viertes Eisenbahnpaket mit dem Ziel, die Effizienz und den Marktanteil innerhalb der EU zu erhöhen³⁵. Im Bereich des Gütertransports sollen umweltfreundliche Güterverkehrskorridore geschaffen werden. Bis 2050 wird die Fertigstellung des Hochgeschwindigkeitsschienennetz angestrebt sowie das ein Großteil der Personenbeförderung bei mittleren Entfernungen über die Schiene realisiert wird³⁶. Laut Energiefahrplan sind neben Strom Biokraftstoffe die beste Option für den Schienenverkehr³⁷.

Verkehrsträger Wasser

Der Verkehrsträger Wasser hat eine enorme Bedeutung für den Handel. 90 % der Exportgüter und 40 % der innerhalb der EU umgeschlagenen Güter werden auf dem Wasser transportiert. Auf Grund mehrerer Schiffsunfälle in den Jahren zuvor wurden 2002 die beiden sogenannten Erika-I- und Erika-II-Gesetzespakete beschlossen, welche die Sicherheit auf See erhöhten

³¹vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 30-31

³²vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

³³vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 13-14

³⁴vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 12

³⁵vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 10

³⁶vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

³⁷vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011a) S. 13

und einwandige Schiffsrümpfe verboten haben. 2005 folgte ein weiteres Paket, welches sich mit Umweltbelangen befasst. Konkret werden die Emissionen, der Schutz des ökologischen Gleichgewichts, die Reduktion von Schiffsabfällen, die Verklappung und verschiedenen Standards berücksichtigt.

Im Bereich der Passagierschifffahrt sind drei wichtige Mechanismen zu nennen:

- Die Einführung von globalen Standards zum Schutz der Passagiere durch die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO).
- Das Durchsetzen der Sicherheitsvorschriften wird überprüft.
- Freiwilliges Engagement zur allgemeinen Leistungsverbesserung der Branche wird unterstützt.

Die Seehäfen in der EU sind wichtig für den Handel. Es wird angenommen, dass das Frachtumschlagsvolumen in Zukunft stark zunimmt. Aus diesem Grund versucht die EU politische Anpassungsprozesse umzusetzen, um in der Zukunft Engpässe vermeiden zu können³⁸.

Auch das Weißbuch formuliert für den Wasserverkehr Ziele. Bis 2050 wird die Senkung der CO₂-Emissionen von Bunkerölen angestrebt. Weiterin wird auch für diese Verkehrsträger die Schaffung von umweltfreundliche Güterverkehrskorridoren sowie der Einführung von umfassenden Managementsystemen angestrebt³⁹.

Verkehrsträger Luft

Seit dem Jahr 2004 versucht die Initiative Single European Sky (SES) durch eine Neuorganisation des Managements des Flugverkehrs eine kollektive Verwaltung des europäischen Luftraums zu erreichen. Ein einziges, einheitliches System senkt die Kosten und erhöht die Effizienz. 5 Jahre später folgte ein zweites Paket, welches als SES II bezeichnet wird. Hierbei liegt der Fokus neben der Kosteneffizienz auf dem Umweltaspekt. Ziele dieser Maßnahmen sind Modernisierung, Einheitlichkeit und die Umsetzung eines europäischen Luftverkehrsraums⁴⁰. Auch das Weißbuch möchte einen einheitlichen europäischen Luftraum sowie die Einführung eines Flugverkehrsmanagement bis 2020 erreichen. Bis zum Jahr 2050 schreibt es eine Emissionsreduktion von 40 % fest⁴¹. Laut Energiefahrplan sind Biokraftstoffe die Hauptoption für den Luftfahrt⁴² zum Erreichen der Ziele.

5.2.2 Deutschland

Bedingt durch die föderale Struktur und die vielen unterschiedlichen Aufgaben existieren in Deutschland eine Vielzahl an Entscheidungsträgern im Bereich der Verkehrspolitik. Aus diesem

³⁸vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 15-16

³⁹vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

⁴⁰vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 12

⁴¹vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011c) S. 11-12

⁴²vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011a) S. 13

Grund ist es schwierig ein einheitliches Leitbild abzuleiten. Der Bund besitzt laut Grundgesetz die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz für den Luftverkehr und die Eisenbahnen des Bundes. Weiterhin unterliegen der Straßen- und Schiffsverkehr sowie der sonstige Schienenverkehr der konkurrierenden Gesetzgebung⁴³. Das BMVi entwickelt die Grundlagen für die Verkehrspolitik des Bundes, hat aber selbst keine Entscheidungsbefugnis. Rechtsverordnungen und Verwaltungsvorschriften können durch den Bundesverkehrsminister erlassen werden. Außerdem siedeln sich im Bereich des Bundesverkehrsministeriums weitere selbstständige Bundesbehörden, bspw. das Kraftfahrt-Bundesamt, an. Zusätzlich sind an den relevanten Entscheidungen in der Verkehrspolitik verschiedene Bundesministerien beteiligt. Wie hoch der Einfluss anderer Ministerien und Behörden ist, schwankt je nach Bereich und den Machtverhältnissen innerhalb der Regierung. Beispielsweise hat sich das Umweltministerium während der rot-grünen Koalition (1998-2005) relativ stark am verkehrspolitischen Diskurs beteiligt. Auch andere Beispiele zeigen, dass die Abgrenzung der Kompetenzen nicht immer eindeutig ist. So konnte sich das Bundesfinanzministerium bei der 2011 eingeführten Luftverkehrssteuer durchsetzen, welche vom Bundesverkehrsminister stark kritisiert wurde⁴⁴.

Auch wenn Fußgänger und Radfahrer nicht weiter berücksichtigt werden ist festzuhalten, dass die Bundesregierung Maßnahmen für die Stärkung des Fuß- und Radverkehr umsetzt (vgl. Nationaler Radverkehrsplan, Verkehrsberuhigung, City-Maut etc.)⁴⁵.

Bundesverkehrswegeplan (BVWP)

Es sinnvoll den Bundesverkehrswegeplan zu nennen. Dieser Plan benennt alle geplanten Investitionen in die Infrastruktur und ist als Absichtserklärung der Bundesregierung zu verstehen. Im BVWP sind alle Investitionen im Infrastrukturbereich für Schiene, Straße und Wasserstraße der kommenden Jahre enthalten. Die aktuelle Version ist der BVWP 2030, welcher Anfang August 2016 vom Bundeskabinett vorgestellt wurde⁴⁶.

Aktionsplan Güterverkehr und Logistik

Der Aktionsplan Güterverkehr und Logistik ist als strategisches Konzept der Bundesregierung zu verstehen. Er enthält konkrete Maßnahmen für die künftige Ausrichtung des Güterverkehrs. Die folgenden fünf Schwerpunkte wurden in dem aktuellen Aktionsplan von 2015 formuliert:

- die Stärkung des Logistikstandortes Deutschland,
- der Erhaltung, Modernisierung und Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur,
- die bessere Vernetzung der Verkehrsträger,
- die Förderung umweltfreundlicher und effizienter Güterverkehr und

⁴³vgl. GG (1949) §73, §74

⁴⁴vgl. FICHERT & GRANDJOT (2016) S. 138-139

⁴⁵vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 17

⁴⁶vgl. BMVI (2016b), online

- die Nachwuchssicherung und die Unterstützung von guten Arbeitsbedingungen.

Zu jedem dieser Punkte werden zahlreiche Unterpunkte und Maßnahmen formuliert, welche im Folgenden bei der Erläuterung zu den einzelnen Verkehrsträgern detaillierter dargestellt werden⁴⁷.

Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)

Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie ist ein Bericht von 2013, welcher konkrete Maßnahmen im Verkehrsbereich benennt, um das Energiekonzept der Bundesregierung umzusetzen (vgl. 5.1.2). Auf der Grundlage verschiedener Fachdialoge beschreibt die MKS Antriebs- und Kraftstoffwahlmöglichkeiten im Verkehrssektor. Besonders hervorgehoben wird, dass die Strategie als sogenannte „lernende Strategie“ zu verstehen ist⁴⁸. Dadurch soll den sich stetig verändernden Rahmenbedingungen Rechnung getragen werden.

Verkehrsträger Straße

Neben den bereits oben erwähnten Flottengrenzwerten, welche auch für Deutschland gelten, gibt es noch weitere politische Regelungen bezüglich des Pkw-Verkehrs. Das Ausbauziel für die Elektrofahrzeuge liegt bei 1 Million bis zum Jahr 2020 (bzw. 5 Mio. bis 2030).

Es erfolgt eine unterschiedliche Besteuerung von Fahrzeugantrieben und Kraftstoffen. Die Befreiung von der Energiesteuer ist für reine Biokraftstoffe 2013 für Biomethan und Bioethanol (E85-Kraftstoff) Ende 2015 ausgelaufen. Erdgas und Flüssiggas sind noch bis 2018 von der Energiesteuer befreit. Zusätzlich wird die Kraftfahrzeugsteuer nach umweltrelevanten Aspekten (CO₂- und Schadstoffemission, Hubraum) ermittelt.

Weiterhin werden rein elektrisch betriebene Fahrzeuge für 10 Jahre von der Kfz-Steuer befreit. Auch durch direkte staatliche Zuschüsse wurde in der Vergangenheit auf den Pkw-Verkehr Einfluss genommen. Im Rahmen der Umweltprämie (auch „Abwrackprämie“) wurden viele Neuzulassungen erreicht, was in Kombination mit den bereits erwähnten Flottengrenzwerten zu einem emissionsärmeren Bestand führte⁴⁹.

Auch ein gezielter Ausbau der Infrastruktur fördert den Umstieg auf alternative Möglichkeiten. Bereits 1995 wurde eine Lkw-Maut (Eurovignette) in Deutschland eingeführt, welche 2005 durch das elektronische System Tollcollect ersetzt wurde. Gebühren werden für Lkw ab 12 t Gesamtmasse erhoben⁵⁰. Außerdem fördert die Bundesregierung die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene bzw. auf das Schiff. Der Aktionsplan Güterverkehr und Logistik der Bundesregierung unterstützt dazu verschiedene Infrastrukturmaßnahmen (Errichtung Umschlaganlagen, Reaktivierung Gleisanschlüsse etc.)⁵¹. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass gleichzeitig die Straßeninfrastruktur ausgebaut wird (siehe 5.2.2).

Nach der Liberalisierung des Busverkehrs stieg ab 2013 der Linienfernverkehr auf der Straße

⁴⁷ vgl. BMVI (2015) S. 2-3

⁴⁸ vgl. BMVBS (2013) S. 5-13

⁴⁹ vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 31-32

⁵⁰ vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 45

⁵¹ vgl. BMVI (2015) S. 31-35

stark an. Durch die Novellierung des Personenbeförderungsgesetz entfiel der Konkurrenzschutz des Schienenverkehrs im Personenfernverkehr. Bis zum Januar 2013 durften Fernbuslinien nur eingeführt werden wenn keine parallele Schienenverbindung bestand⁵².

Verkehrsträger Schiene

Straßen- und U-Bahnen werden durch die Kommunen sowie die Fahrgasteinnahmen finanziert. Problematisch sind Renovierungsmaßnahmen, da diese ohne Zuschüsse von Bund und Ländern umgesetzt werden müssen. Vielen Kommunen fehlen die Mittel um die verhältnismäßig aufwändige Infrastruktur zu modernisieren bzw. zu erhalten. Jedoch genießen Straßen- und U-Bahn aufgrund der ökologischen Nachhaltigkeit politische Vorteile. Die Betreiber werden durch das EEG weitestgehend von der Zahlung der Umlage befreit, was zu einer Kostensenkung und so zu Vorteilen gegenüber anderen Verkehrsmitteln führt⁵³.

Langfristig soll der Schienenverkehr gefördert werden, so wurde 2016 ein neues Eisenbahnregulierungsgesetz (ERegG) beschlossen. Dieses sichert den Ländern zu, dass sie die Trassenpreise nur in Höhe der Dynamisierung der Regionalisierungsmittel tragen müssen. Die drei wichtigsten Kernelemente sind, dass:

- die Trassenpreise vor der Einführung durch die Bundesnetzagentur genehmigt werden,
- Anreize zur Kostensenkung für die Betreiber der Schienennetze geschaffen werden und
- die Position der Bundesnetzagentur erheblich gestärkt wird⁵⁴.

Ob dies aber tatsächlich zu einer Stärkung führt wird kritisch gesehen. Beispielsweise ist fraglich wie die entstandenen Defizite finanziert werden sollen. Letztendlich kann eine Kostendeckung nur über Einnahmen aus dem Schienenpersonenverkehr erfolgen (siehe ⁵⁵). Weiterhin empfiehlt die MKS der Bundesregierung neben bereits bekannten Ansätzen, wie Ausbau der erneuerbaren Energien und Effizienzsteigerung, vor allem den Anschluss an andere Mobilitätsangebote (z. B. Carsharing)⁵⁶.

Der Aktionsplan Güterverkehr und Logistik des Bundesministeriums schlägt verschiedene Maßnahmen für den Schienenverkehr vor. Diese Maßnahmen sind:

- die Nutzung der Chancen der europäischen Schienenverkehrskorridore,
- das Auflösen der Engpässe,
- längere Güterzüge,
- die Sicherung der Verkehrstauglichkeit von Eisenbahnüberführungen und

⁵²vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 21.

⁵³vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 24

⁵⁴vgl. BMVI (2016a), online

⁵⁵vgl. ALLIANZ PRO SCHIENE (2016), online

⁵⁶vgl. BMVBS (2013) S. 60

- die Verbesserung der Interoperabilität⁵⁷.

Verkehrsträger Luft

Der Luftverkehr war lange, genauso wie die Binnenschifffahrt, von der Versteuerung des Brennstoffverbrauchs befreit. Als Ausgleich und zur Finanzierung von Infrastrukturmaßnahmen wird seit 2011 eine Luftverkehrssteuer erhoben. Allerdings gilt diese nur für in Deutschland startende Passagierflüge⁵⁸. Auch in Zukunft möchte die Bundesregierung laut MKS am ETS festhalten und die Einnahmen für den Klimaschutz und die Energieeffizienz in der Luftfahrt einsetzen⁵⁹.

Verkehrsträger Wasser

Analog der europäischen Politik wird auch in Deutschland eine Verlagerung des Güterverkehrs zugunsten der Binnenschifffahrt angestrebt. Jedoch besteht kein spezifisches Ausbauziel. Die Bundesregierung unterstützt den Einbau energieeffizienter Motoren in der Binnenschifffahrt sowie den innovativen Schiffsbau ⁶⁰.

Abschließend sind die wichtigsten Eckpunkte der Verkehrs- und Umweltpolitik in der Tabelle 5.2 zusammengestellt.

⁵⁷vgl. BMVI (2015) S. 9, 15-19, 33

⁵⁸vgl. HOHENBERGER & MÜHLENHOFF (2014) S. 54-55

⁵⁹vgl. BMVBS (2013) S. 50

⁶⁰vgl. WSV (2015a), WSV (2014), WSV (2015b)

Tabelle 5.2: Zusammenfassung Ziele Umwelt- und Verkehrspolitik

Ziel	Bereich	Sektor	2020	2030	2040	2050	Quelle
Senkung der Treibhausgasemission	EU	Alle	20-30%	40 % Vergleichsjahr 1990		60-80% bzw. 80-95% Vergleichsjahr 1990	EUROPEISCHE KOMMISSION (2016), 406/2009/EG (2009)
	EU	Verkehr		Ca. 20 % Vergleichsjahr 2008 bzw. 25 % Vergleichsjahr 1990		Mind. 60 % Vergleichsjahr 1990	EUROPEISCHE KOMMISSION (2011 ^c)
	D	Alle	40% Vergleichsjahr 1990	55% Vergleichsjahr 1990	70% Vergleichsjahr 1990	Mind. 80% Vergleichsjahr 1990	BMWi & BMU (2010), PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (2015)
Reduktion des Energieverbrauchs	EU	Alle	20% Vergleichsjahr 1990				406/2009/EG (2009)
	D	Verkehr	10% Vergleichsjahr 2005				BMWi & BMU (2010), PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (2015)
Anteil der regenerativen Energien	EU	Alle	20 %^a				2009/28/EG (2009)
	EU	Verkehr	10 %^b				2009/28/EG (2009)
	D	Alle	18%^c	30%	45%	60%	BMWi & BMU (2010), PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (2015)

^aAnteil am Brutto-Endenergieverbrauch^bAnteil Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger^cAnteil Brutto-Endenergieverbrauch

5.3 Handlungsfelder

Im folgenden sollen die Möglichkeiten der Politik, basierend auf den bereits vorgestellten Ergebnissen, dargestellt werden. Zu berücksichtigen ist, dass Europa und Deutschland nur teilweise getrennt betrachtet werden können.

Wie die große Anzahl der genannten gesetzlichen Regelungen bzw. Zielvereinbarungen sowie die häufige Novellierung zeigen, ist sich die Politik der Bedeutung der Themen Verkehr und Umwelt bewusst. Jedoch ist der Konflikt, welcher zwischen den klimapolitischen Zielen und der gewünschten Mobilität entsteht, anzumerken. Eine große Herausforderung sind die technologischen-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur CO₂-Reduktion. Durch die zu erwartenden Randbedingungen wird der Verkehrssektor wohl weiterhin stark auf fossile Ressourcen zurückgreifen. Zu bedenken ist außerdem, dass zum Erreichen der Ziele über einen längeren Zeitraum Konstanz nötig ist.

Positiv zu bewerten ist, dass für alle Verkehrsträger konkrete Ziele und Maßnahmen benannt werden. Es besteht Bedarf bei der tatsächlichen Umsetzung der formulierten Ziele. So ist beispielsweise der europäische Luftverkehr weit entfernt von einer Umsetzung der SES II, d.h. es gibt noch keinen integrierten europäischen Luftraum (vgl. 5.2.1).

Die europäische Kommission selbst benennt folgende Herausforderungen für die kommenden Jahre:

- der Anstieg der Verkehrsnachfrage, insbesondere des Frachtverkehr
- die Dominanz von fossilen Rohstoffen
Die Abhängigkeit vom Erdölmarkt soll durch alternative, zuverlässige Brennstoffe beendet werden.
- die Erhöhung der Effizienz
Dies bedeutet sowohl mit Hilfe von modernen und intelligenten Systemen (IKT) die Verkehrseffizienz zu erhöhen als auch die Änderung der Reisegewohnheiten hin zur Kombination aller Verkehrsträger⁶¹.

Diese relativ allgemein gehaltenen Ziele sind auch auf Deutschland zu übertragen. Es sind sehr viele verschiedene Akteure betroffen, welche teilweise unterschiedene Ziele verfolgen. Insgesamt zeigt sich, dass die Energiewende in Deutschland erhebliche Herausforderungen aber auch große Chancen bietet, diese sind Tabelle 5.3 zusammengestellt.

⁶¹vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014b) S. 18

Bereich	Situation	Entwicklung, Herausforderungen
Straße		
	<ul style="list-style-type: none"> • Pkw - dominierendes und ineffizientes Verkehrsmittel mit hohen Zuwachsraten • Pkw - geringe, aber steigende Anteile an Biokraftstoffen und Elektromobilität • Lkw - ineffizientes Verkehrsmittel mit sehr hohem Zuwachs • Lkw - Biokraftstoffe mittelfristig einzige erneuerbare Möglichkeit • Bus - energieeffizient bei Betrieb mit Biodiesel oder Strom 	<ul style="list-style-type: none"> • Alternative Antriebsmöglichkeiten - Forschung, Markteinführung • Verlagerung und Kombiniertes Verkehr • Verhaltensänderung (MIV) • Optimierung Angebot (ÖPNV) • Effizienzsteigerung
Schiene		
	<ul style="list-style-type: none"> • Hauptakteur der Energiewende im Verkehrssektor (vgl. Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie) • Elektromobilität und Biodiesel • energieeffizienter Verkehr mit leicht und schnell steigendem Anteil an erneuerbaren Energien 	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung des erneuerbaren Energienanteils • große Teile Straßenverkehr können auf die Schiene verlagert werden • Optimierung des Angebots • Nutzung des Bahnstromnetzes
Wasser		
	<ul style="list-style-type: none"> • effizientes Güterverkehrsmittel, hohe strukturelle Wachstumshürden • Biokraftstoffe sind mittelfristig einzige erneuerbare Möglichkeit, 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau Kombiniertes Verkehr • Elektromobilität im Kurzstreckenbereich • Bereitstellung ausreichender Mengen nachhaltiger Kraftstoffe
Luft		
	<ul style="list-style-type: none"> • ineffizientes Verkehrsmittel mit sehr hohen Zuwachsraten • Biokraftstoffe sind mittelfristig einzige erneuerbare Möglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Forschung und Entwicklung nötig (Biokerosin, synthetisches Kerosin, Effizienzsteigerung) • Verkehrsvermeidung und -verlagerung insbesondere Kurzstreckenflüge auf die Schiene

Tabelle 5.3: Anteil und Herausforderungen Verkehrsträger an der Energiewende

6 Zukunftsszenarien

Es stellt sich die Frage, wie die zukünftige Entwicklung in Deutschland hinsichtlich Energieaufwand und CO₂-Emissionen aussehen wird. In diesem Kapitel werden insgesamt drei verschiedene Szenarien untersucht. Zu Beginn werden alle relevanten Randbedingungen ermittelt. Anschließend erfolgt die Ableitung eines Rechenmodells, welches in Microsoft Excel mit Hilfe von Visual Basics for Applikation (VBA) umgesetzt wird. Nach der Beschreibung und Untersuchung der drei Szenarien werden diese bewertet. Betrachtet werden ein Trendszenario, ein Best-Case-Szenario und ein Szenario, welches die politischen Ziele der Bundesregierung umsetzt.

6.1 Randbedingungen

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen werden von zahlreichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Die technologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen lassen sich teilweise nur schwer von einander abgrenzen. Für einen besseren Überblick wurde ein Großteil der Parameter in die 4 Bereiche Fahrzeug, Umwelt, Nutzer und Infrastruktur geclustert. Natürlich können einzelne Faktoren auch mehreren Bereichen zugeordnet werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das komplexe Wirkmodell nur schwer vollständig abzubilden ist. Beispielsweise haben folgende Faktoren einen Einfluss auf den Energieaufwand und die CO₂-Emission:

- Fahrzeug
 - Fahrzeugart
 - Spezifischer Verbrauch
 - Spezifische Emissionen
 - Gewicht
 - Antriebssystem
 - Finanzierung
 - Entwicklung, Förderung von Technologien u.a.
- Infrastruktur
 - Stadtstruktur
 - Qualität der Infrastruktur
 - Mobilitätsangebot
 - Erschließung
 - Verkehrswege
 - Information

- Organisation u.a.
- Nutzer
 - Entwicklung der Bevölkerung
 - Altersstruktur
 - Tätigkeit
 - Demografischer Wandel
 - Verhalten
 - Einkommen, Finanzen
 - Bewusstsein für die Umwelt u.a.
- Umwelt
 - Kraftstoffart
 - Verfügbarkeit von Ressourcen
 - Kosten
 - Politik
 - Forschung
 - Management von Parkraum, Mobilität etc.
 - Gesetzliche Regelungen u.a.

Basierend auf allen oben dargestellten Einflüssen erfolgt die Ableitung eines Kausaldiagramms. Durch die Konzentration auf die, im Rahmen dieser Arbeit, relevanten Faktoren ist eine deutliche Reduktion der Parameter möglich. Die Zusammenhänge sind der Abbildung 6.1 zu entnehmen.

Die Trendprognosen des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung und der Fahrleistung stecken die Entwicklung des Verkehrssektors und somit auch die des Energieverbrauchs und der CO₂- Emissionen ab¹.

¹vgl. VOIGT & HOPF (2013) S. 5-6

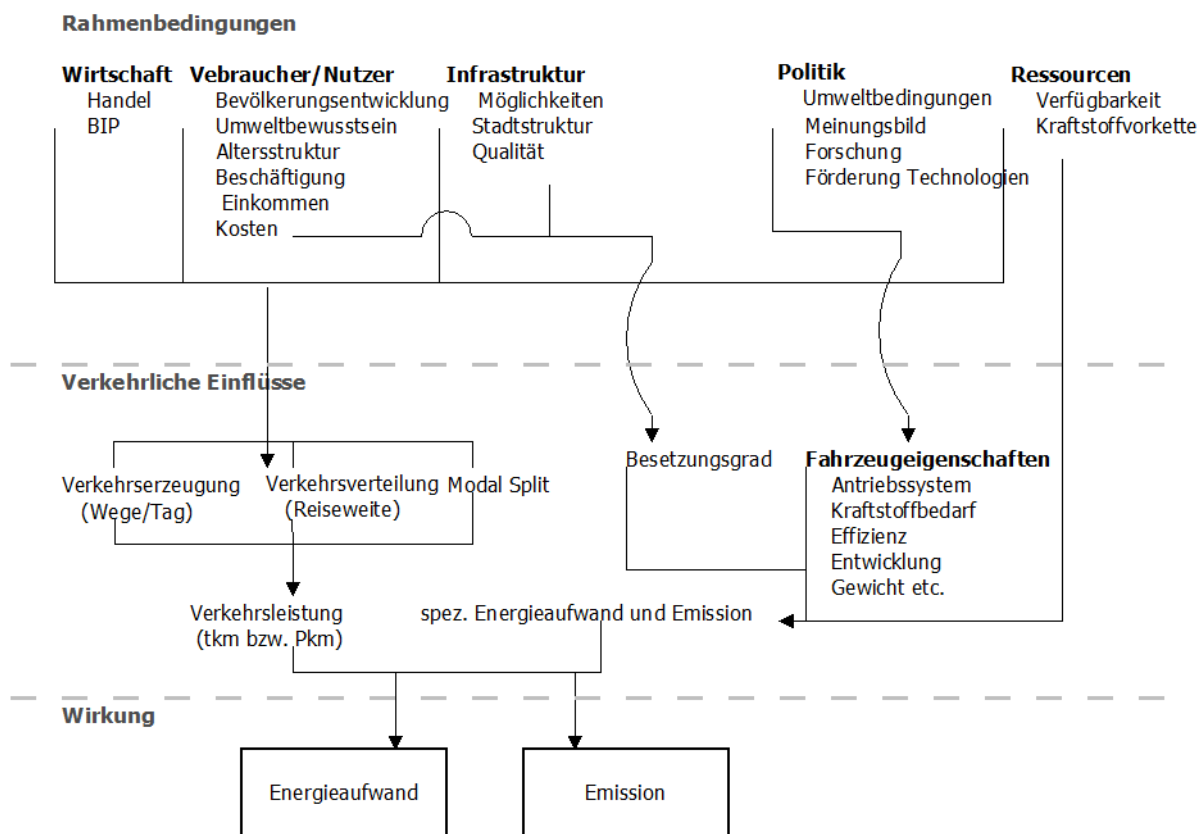


Abbildung 6.1: Kausaldiagramm [eigene Darstellung]

6.2 Rechenmodell

Auf Basis des bereits dargestellten Kausaldiagrammes ist ein Rechenmodell mit Hilfe von Visual Basics for Application entstanden. Ziel der Arbeit ist die Untersuchung ausgewählter Schwerpunkte. Dazu wurden in diesem Schritt weitere Abgrenzungen vorgenommen. Das entstandene Modell dient im Weiteren als Rechengrundlage für die verschiedenen Szenarien.

6.2.1 Visual Basics for Application (VBA)

Visual Basic for Application (VBA) ist eine Makroprogrammiersprache welche für alle Anwendungsprogramme von Microsoft, beispielsweise Excel oder Access, verfügbar ist. Mit Hilfe von VBA kann die Bedienung von Excel automatisiert und somit vereinfacht werden. VBA kombiniert die herkömmliche Makroprogrammiersprache mit der Windows-Programmiersprache Visual Basic, d.h. es werden sowohl Schlüsselwortbezeichnungen aus der Makrosprache als auch der objekt- und ereignisorientierte Sprachansatz von Visual Basic verwendet². VBA bietet sowohl Vor- als auch Nachteile (siehe Tabelle 6.1).

Für die vorliegende Arbeit fiel die Wahl auf VBA, da eine flexible Werteingabe möglich ist und die vorgegebenen Daten beliebig kombiniert werden können. Weiterhin können alle Daten in

²vgl. KOFLER (1996) S. 78-79

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • objektorientiert - Zellbereiche, Diagramme etc. werden als Objekte bezeichnet und besitzen jeweils bestimmte Eigenschaften. • ereignisorientiert - Das Anklicken eines Buttons bzw. Symbols führt zum automatischen Aufruf des entsprechenden Makros. • integrierte Hilfsmittel zur Fehlersuche • beliebig erweiterungsfähig • integrierte Dialog- und Menüeditor 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprachumfang ist sehr groß und unübersichtlich • vergleichsweise lange Formulierungen • teilweise fehlende Merkmale (bspw. in neuen Dialog kann keine Datenmaske definiert werden)

Tabelle 6.1: Vor- und Nachteile VBA nach [KOFER (1996) S. 79-80]

einer Tabelle ausgegeben und anschließend verglichen werden.

6.2.2 Verwendetes Modell

Als Grundlage und Startsituation dient der Ist-Zustand. Dies bedeutet, dass alle hinterlegten Werte, welche beim Starten des Programms angezeigt werden, den momentanen Gegebenheiten entsprechen. Der Großteil der Werte wurde mittels Literaturrecherche ermittelt. Allerdings war dies nicht bei allen möglich, weshalb manche Eingangswerte geschätzt wurden. Es ist zu betonen, dass das Tool vor allem Aussagen über die Größenordnungen und keine detailgetreue Abbildung liefern soll. Das Programm wird auf dem beiliegenden Datenträger ebenfalls abgegeben.

Hinterlegte Parameter

Auf eine detaillierte Darstellung der in dem Formular hinterlegten Formeln soll hier verzichtet werden. Jedoch werden im Folgenden die verwendeten Grundlagen dargestellt.

Energieaufwand des Personenverkehrs

$$E_{PV,i} = x * \sum_{i=1}^k (p_i * E_{Person,i} * s_i) * 365 \quad (6.1)$$

$$E_{PV} = \sum E_{PV,i} \quad (6.2)$$

$E_{PV,i}$	Energieaufwand je Verkehrsträger und Jahr
x	Anzahl Wege pro Tag
p_i	Modul-Split Anteil je Verkehrsträger
$E_{Person,i}$	spezifischer Energieaufwand pro Person und Reiseweite je Verkehrsträger
s_i	durchschnittliche Reiseweite
E_{PV}	Energieaufwand Personenverkehr

Energieaufwand des Güterverkehrs

$$E_{GV,i} = x * \sum_{i=1}^k (p_i * E_{Tonne,i} * s_i) * 365 \quad (6.3)$$

$$E_{GV} = \sum E_{GV,i} \quad (6.4)$$

$E_{GV,i}$	Energieaufwand je Verkehrsträger und Jahr
x	Anzahl Tonnen pro Tag
p_i	Modul-Split Anteil je Verkehrsträger
$E_{Tonne,i}$	spezifischer Energieaufwand pro Tonne und Transportweite je Verkehrsträger
s_i	durchschnittliche Transportweite
E_{GV}	Energieaufwand Güterverkehr

CO₂-Emissionen des Personenverkehrs

$$C_{PV,i} = x * \sum_{i=1}^k (p_i * C_{Person,i} * s_i) * 365 \quad (6.5)$$

$$C_{PV} = \sum C_{PV,i} \quad (6.6)$$

$C_{PV,i}$	CO ₂ -Emission je Verkehrsträger und Jahr
x	Anzahl Wege pro Tag
p_i	Modul-Split Anteil je Verkehrsträger
$C_{Person,i}$	spezifische CO ₂ -Emission pro Person und Reiseweite je Verkehrsträger
s_i	durchschnittliche Reiseweite
C_{PV}	CO ₂ -Emission Personenverkehr

CO₂-Emission des Güterverkehrs

$$C_{GV,i} = x * \sum_{i=1}^k (p_i * C_{Tonne,i} * s_i) * 365 \quad (6.7)$$

$$C_{GV} = \sum C_{GV,i} \quad (6.8)$$

$C_{GV,i}$	CO ₂ -Emission je Verkehrsträger und Jahr
x	Anzahl Tonnen pro Tag
p_i	Modul-Split Anteil je Verkehrsträger
$C_{Tonne,i}$	spezifische CO ₂ -Emission pro Tonne und Transportweite je Verkehrsträger
s_i	durchschnittliche Transportweite
C_{GV}	CO ₂ -Emission Güterverkehr

Es wurden weiterhin folgende Zusammenhänge berücksichtigt:

Der Wirkungsgrad beeinflusst den Energieaufwand. Die CO₂-Emissionen schwanken je nach verwendeter Antriebsart und Kraftstoffwahl. Die spezifischen Werte $E_{Person,i}$ und $C_{Person,i}$ sind vom Besetzungsgrad abhängig. Eine entsprechende Anpassung der Werte ist ebenfalls im Formular hinterlegt, wird hier aber nicht im Detail dargestellt.

Eine Überprüfung bzw. Beschränkung der Summe des Modal Splits erfolgte aus zwei Gründen nicht. Zum einen berücksichtigt das Formular Fußgänger sowie Radfahrer nicht, so dass das prüfen, ob die Summe bei 100% liegt nicht sinnvoll ist. Zum anderen ist das Formular vorrangig für die Bearbeitung der vorliegenden Arbeit entstanden. Eine entsprechende Erweiterung wäre aber problemlos möglich.

Die Werte der Verkehrsleistung schwanken in Abhängigkeit vom Modal Split sowie der durchschnittlichen Reise- bzw. Transportweite. Die tendenzielle Entwicklung wird in jedem Fall abgebildet, auch wenn eine genaue Berechnung nicht gegeben ist. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der These und verschiedener Argumente, deshalb wurde dies nicht weiter verfeinert.

Oberfläche

Das Formular gliedert sich in mehrere Bereiche (siehe Abbildung 6.2 bzw. Anhang). Im oberen Teil werden übergreifende Informationen angezeigt. In der Mitte sind jeweils die spezifischen Werte, getrennt nach Personen- und Güterverkehr, angeordnet. Zusätzlich erfolgt eine Unterteilung in die einzelnen Verkehrsträger. Abschließend gibt es noch drei verschiedene Möglichkeiten der Detaillierung, welche im unteren Teil des Formulars angezeigt werden.

Insgesamt können im Formular folgende Werte eingetragen werden:

- die Bevölkerungszahl,
- die Anzahl der Wege/Tag und die Anzahl der Tonnen/Tag,
- der Modal Split,
- die durchschnittliche Reiseweite,
- der Wirkungsgrad,
- der Besetzungsgrad,
- der spezifische Primärenergieaufwand,
- die spezifischen CO₂-Emissionen,
- der Anteil und die CO₂-Emission der verschiedenen Energieträger am Strommix.
- der Stromanteil der verschiedenen Verkehrsträger und
- der Anteil und die CO₂-Emission des Kraftstoffmix des MIV.

Berechnungsformular

Die eingetragenen Werte sind lediglich als Vorschlag zu verstehen und sind beliebig anzupassen.

Bevölkerung: 81280500 * Anzahl Wege/Tag: 3,4 * Tonnen/Tag: 11500000 *

		Modal Split	Reiseweite	Wirkungsgrad	Besetzungsgrad	spez. Primärenergieaufwand [kWh/km]	spez. CO ₂ -Emission [g/km]
Personenverkehr	Fernbus	0,05	300	0,35	0,28	0,162	30,3
	MIV	0,5	14,7	0,35	0,3	0,54	137,2
	Schiene	0,065	34	0,89	0,33	0,26	56,12
	ÖPNV	0,09	21,3	0,5	0,23	0,3	70,2
	Luft	0,001	468	0,35	0,68	0,83	218,0
Güterverkehr	Straße	0,821	104	0,35		0,365	93,5
	Schiene	0,094	302	0,89		0,102	22,26
	Wasser	0,06	271	0,35		0,125	33,13
	Luft	0,001	400	0,35		7,33	1924

Berechnen Abbruch

Herstellung des Strommixes anpassen?

☐ ja Anteil am Strommix CO₂-Emission [g/km]

☒ nein

Erdgas	0,153	25
Kohle	0,45	300
Kernenergie	0,153	12
Erneuerbare Energie	0,24	7

Stromanteil der Verkehrsträger anpassen?

☐ ja ☒ nein Stromanteil

MIV	0,01
ÖPNV	0,3
Personenschienenverkehr	0,9
Güterschienenverkehr	0,9

MIV - Kraftstoffmix anpassen?

☐ ja Anteil am Kraftstoffverbrauch Primärenergieaufwand [kWh/km] CO₂-Emission [g/km]

☒ nein

Benzin	0,4	0,244	58,84
Diesel	0,2	0,21	49,46
Strom	0,2	0,086	19,22
Plug-in Hybrid	0,2	0,125	28,5

Abbildung 6.2: Oberfläche Eingabeformular [eigene Darstellung]

Alle Informationen können durch den Nutzer angepasst werden. Die drei unteren Wahlmöglichkeiten sind zu Beginn deaktiviert und werden nur bei entsprechender Auswahl durch den Nutzer aktiviert. Diese Wahlmöglichkeiten werden genauer in Kapitel 6.2.2 erläutert.

Ausgabewerte

Die berechneten Werte splitten sich in 2 Datenblätter (siehe Anhang). Zum einen wird ein äußerst grobes Übersichtsblatt ausgegeben, welches lediglich Informationen über das Verkehrsaufkommen, den Energieaufwand und die CO₂-Emission bietet. Zum anderen wird ein zweites, sehr viel detaillierteres Blatt ausgegeben, dem alle Einzelheiten zu entnehmen sind. Dies bietet die Möglichkeit Werte zu verändern und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu vergleichen. Die Daten werden getrennt nach Personen- und Güterverkehr sowie für die einzelnen Verkehrsträger ausgegeben.

Fehlerabfang-Codes wurden nur wenige eingefügt, da das Programm vorrangig zur Bearbeitung der Aufgabenstellung werden soll.

Besonderheiten

Das Formular bietet drei verschiedene Detaillierungsgrade. Diese wurden auf Grund der Thematik dieser Arbeit hinzugefügt. Folgende Werte können angepasst werden:

- der Anteil und die CO₂-Emission der verschiedenen Energieträger am Strommix,
- der Stromanteil der verschiedenen Verkehrsträger und
- der Anteil und die CO₂-Emission des Kraftstoffmix des MIV.

Neben den Auswahlmöglichkeiten gibt es weitere Besonderheiten im Formular. Damit die Herkunft der hinterlegten Startwerte sauber nachzuvollziehen ist, wurden alle Quellen hinterlegt. Bewegt der Nutzer die Maus über das jeweils hinter dem Eingabefeld angeordnete Sternchen (*) erscheinen Startwert und Quelle des Datensatzes.

Weiterhin werden einige weniger geläufige Begriffe bei entsprechender Mausbewegung über diese näher erläutert.

6.3 Entwicklung der Szenarien

Im Folgenden werden verschiedene Szenarien entwickelt. Szenarien beschreiben verschiedene zukünftige Situationen, welche sich aus der Gegenwart entwickeln könnten. Die gegenwärtige Situation wurde in den vorangegangenen Kapiteln hinreichend definiert. Die entsprechenden Daten und gegenseitigen Einflüsse wurden in dem Formular hinterlegt. Es werden insgesamt 3 Szenarien definiert. Als Zieljahr gilt 2050, da dieses von der Europäischen Kommission bzw. von der Bundesregierung ebenfalls als Bezugsjahr gewählt wird. Eine Quantifizierung von demographischen, wirtschaftlichen, preis- und verkehrspolitischen Faktoren findet nur im begrenzten Rahmen statt. Diese Rahmenbedingungen sind vielen Ungewissheiten unterworfen und haben nur wenig Aussagekraft.

Die Herangehensweise unterscheidet sich bei den Szenarien. Die ersten beiden werden mit Hilfe einer festen Matrix untersucht (siehe 6.2). Das dritte Szenario hingegen wird auf Grundlage definierter Ziele untersucht. Es ist aber anzunehmen, dass sich die tatsächliche Entwicklung in dem Korridor zwischen Trend- und Best-Case Szenario bewegen wird.

Allerdings gibt es einige Bedingungen, welche immer gleich bewertet werden:

- Die Bevölkerungszahl wird als rückläufig angenommen. Das STATISTISCHE BUNDESAMT geht von 71 bis 76 Mio. Menschen im Jahr 2050 aus³. Interessant ist, dass die Zahl, im Vergleich zu früheren Abschätzungen, deutlich gestiegen ist. Die Hochrechnung von 2006 erwartet eine Bevölkerungszahl zwischen 68 und 74 Mio. im selben Jahr⁴. In den Szenarien wird von 74 Mio. Menschen ausgegangen.
- Es wird angenommen, dass die Verkehrs- und Transportleistung steigt. Gründe sind vor allem das Wirtschaftswachstum und der zunehmende Individualverkehr. Aus diesem Grund steigen die Anzahl der Wege bzw. der Tonnen pro Tag. In Anlehnung an den Bundesverkehrswegeplan wird von einem jährlichen Zuwachs im Personenverkehr von 0,5

³vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT (2015) S.17

⁴vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT (2006) S.15

% und im Güterverkehr von 1,3% ausgegangen. Laut BVWP soll die Transportleistung bis 2030 jährlich um rund 1,9% auf 38% zunehmen. Jedoch sei zu erkennen, dass aufgrund der sinkenden Transportelastizität die Sättigungsgrenze bald erreicht sei. Deshalb wird von einem etwas geringeren Wachstum über den Betrachtungszeitraum ausgegangen⁵.

- Es werden in allen Szenarien nur Verbrennungsmotoren, Elektroantrieb und Hybride berücksichtigt, da sich diese laut Literaturrecherche durchsetzen sollen (vgl. Kapitel Antriebsarten). Brennstoffzellen und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren werden nicht mit einbezogen.
- Die Emissionswerte für die verschiedenen Kraftstoffe bzw. Stromerzeugung werden über den Zeitraum als stabil angenommen und sind somit im Ausgangsjahr und in der Prognose als konstant angenommen.
- Der eingesetzte Energieträger beeinflusst natürlich auch die Entwicklung der Infrastruktur, dies wird im Rahmen der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

6.3.1 Trendszenario

In diesem Szenario wird die Entwicklung von Energieaufwand und CO₂-Emission unter der Annahme prognostiziert, dass die momentanen Gegebenheiten im wesentlichen beibehalten werden. Natürlich werden die sich abzeichnenden relevanten Einflussfaktoren, wie Effizienzsteigerung und Veränderungen des preispolitischen Rahmens mit einbezogen.

Die Reise- und Transportweiten steigen leicht an. In Anlehnung an die Entwicklung der letzten Jahre nimmt dabei die Transportweite stärker als die durchschnittliche Reiseweite zu. Folgende Entwicklungen werden angenommen:

- die Zunahme von Verkehrs- und Transportaufkommen,
- der Modal Split bleibt unverändert,
- die geringe Effizienzsteigerung im Fahrzeug- und Kraftstoffbereich,
- die Erdölpreise bleiben durch Subventionen weitestgehend konstant,
- der Anteil an erneuerbare Energien stagniert,
- die Reiseweite steigt leicht an und
- die Transportweite wächst etwas stärker an.

⁵vgl. SCHUBERT ET AL. (2014) S. 5-8

Parameter	Trendszenario	Best-Case-Szenario
Bevölkerung	74 Mio.	74 Mio.
Wege/Tag	+ 0,6 % p.a.	+ 0,6 % p.a.
Tonnen/Tag	+ 1,3 % p.a.	+ 1,3 % p.a.
Wirkungsgrad	jeweils +5 %	jeweils +10 % (Ausnahme Schienenverkehr, als obere Grenze 95 % angenommen)
Reiseweite	jeweils +5 %	jeweils +5 %
Transportweite	jeweils +10 %	jeweils +10 %
Besetzungsgrad	keine Veränderung	jeweils +10 %

Tabelle 6.2: Parameter Szenarien

6.3.2 Best-Case-Szenario

In diesem Szenario wird angenommen, dass die Entwicklung, im Sinne der Nachhaltigkeit, positiv verläuft. Jedoch werden die realistischen Grenzen berücksichtigt. So bleibt beispielsweise im Personenverkehr der Pkw ein häufig genutztes Verkehrsmittel, da das Angebot des Nahverkehrs und die Taktfrequenz nicht immer den individuellen Mobilitätsbedingungen entsprechen können. Mit Hinblick auf die demografische Entwicklung im ländlichen Raum ist dies auch in Zukunft anzunehmen. Auch im Güterverkehr gibt es bestimmte Grenzen. Kleinere Frachtmengen lassen sich meist nicht bedarfsgerecht über die Schiene transportieren. Weiterhin ist die Bahn im Vergleich zu einem Lkw räumlich und zeitlich unflexibler.

Folgende Entwicklungen werden angenommen:

- Stromanteil und Anteil der erneuerbaren Energien steigt
Der Strommix besteht aus jeweils 10 % Strom aus Erdgas und Kohle und 80 % aus erneuerbaren Energien. Weiterhin wird der Stromanteil im ÖPNV auf 40 % und im Schienenverkehr jeweils auf 95 % erhöht.
- Eine starke Verlagerung von der Straße auf die Schiene
Der Modal Split des Güterverkehrs wird dementsprechend angepasst (siehe 6.3).
- Eine starke Effizienzsteigerung
Durch die Effizienzsteigerung kann der Wirkungsgrad erhöht werden (siehe 6.2).
- Die stärkere Bewusstseinsbildung
Um das Umweltbewusstsein abzubilden, wird der Besetzungsgrad des Personenverkehrs jeweils um 10 % erhöht.
Weiterhin verändert sich der Modal Split im Personenverkehr stark (siehe 6.3). Der Anteil an Fußgängern und Radfahrern erhöht sich stark, was auch der Modal Split zeigt.
- Eine Veränderung der Zusammensetzung des MIV
Der Anteil der Benzin- und Dieselfahrzeuge wird jeweils auf 10 % gesenkt. Elektrofahr-

zeuge hingegen steigen auf 30 % und Plug-In-Hybride auf 50 %. Die starke Durchsetzung des Hybrids erfolgt in Anlehnung an die in Kapitel 3.3.4 genannte Entwicklung.

Verkehrsträger	Personenverkehr	Güterverkehr
Straße	20 % (MIV)	50 %
	15 % (Fernbus)	
	15 % (ÖPNV)	
Schiene	15 %	39 %
Luft	0,1 %	0,1 %
Wasser		10 %

Tabelle 6.3: Modul Split Szenario Best-Case-Szenario

6.3.3 Politisches Szenario

Die Herangehensweise dieses Szenarios unterscheidet sich von den beiden vorangegangenen. Hier sollen die Auswirkungen und die notwendigen Maßnahmen der politischen Ziele untersucht werden. Am Ende können die Fragen beantwortet werden, ob die geplanten Maßnahmen den gewünschten Effekt haben. Was muss umgesetzt werden um die klimapolitischen Ziele erreichen zu können?

Untersucht werden, wie die folgenden Ziele der Bundesregierung erreicht werden können:

- eine Reduktion des Energieaufwands um ca. 30% im Vergleich zu 2005
In Anlehnung an das für das Jahr 2020 gesteckte Ziel (10 % im Vergleich zu 2005) wird von einem anhaltenden Reduktionswunsch ausgegangen. Der Energieaufwand des Verkehrssektors lag 2005 bei ca. 718,33 TWh. Bei einer Reduktion um 30 % sollte der Energieaufwand im Jahr 2050 maximal bei 503 TWh liegen.
- eine Reduktion der Treibhausgasemission mindestens um 80 % im Vergleich zu 1990
Im Jahr 1990 lagen die Treibhausgasemissionen bei 163 Mio. t. Eine Reduktion um 80 % erlaubt eine Emission von maximal 33 Mio. t. Zu bedenken ist, dass die Treibhausgasemissionen etwas höher liegen als die reinen CO₂-Emissionen. Allerdings wird dies in der folgenden Betrachtung vernachlässigt.
- die Anzahl Elektroautos rund 15. Mio. (Anteil MIV rund 30 %)
15 Mio. Elektrofahrzeuge entsprechen ungefähr 33 % des momentanen Fahrzeugbestands (45,7 Mio.⁶). Die Entwicklung des Bestands wird als konstant angenommen. Die Bundesregierung hat sich 1 Million Elektroautos bis zum Jahr 2020 (bzw. 2030: 5 Mio.) als Ziel gesetzt. Es wird angenommen, dass die Infrastruktur entsprechend ausgebaut wird, sowie die Forschung an Elektrofahrzeugen insbesondere der Batterietechnik voranschreitet. Aus

⁶vgl. STATISTA.COM (2016), online

diesem Grund wird von einer positiven Entwicklung bis zum Jahr 2050 ausgegangen und eine Anzahl von 15 Mio. Fahrzeugen angenommen.

Durch ein iteratives Herangehen werden die verschiedenen Möglichkeiten zum Erreichen der genannten Ziele untersucht. Die Eingabewerte sind der Tabelle 6.4 im folgenden Abschnitt zu entnehmen.

6.4 Bewertung der Szenarien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei bereits vorgestellten Szenarien dargestellt (siehe Abbildung 6.3). Weiterhin haben die Untersuchungen die Einschränkungen des verwendeten Modells aufgezeigt. Aus diesem Grund werden diese Grenzen am Ende des Abschnitts kurz erläutert.

6.4.1 Ergebnis des Trendszenario

Die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen, dass der Energieaufwand und die CO₂-Emission stark steigen. Es wird ein Energieaufwand von rund 780 TWh und eine CO₂-Emission von 180 Mio. t. erwartet. Obwohl die Bevölkerungsanzahl sinkt, nehmen die Personenverkehrs- und Güterverkehrsleistung stark zu. Insbesondere die angenommenen Zunahmen von Reise- bzw. Transportweiten haben große Auswirkungen auf CO₂-Emission und Energieaufwand.

Die moderate Effizienzsteigerung hat nur einen geringen Einfluss. Daraus lässt sich schließen, dass die Hebelwirkung der Effizienzsteigerung relativ gering ist. Insbesondere bei einem starken Verkehrsaufkommenzuwachs ist der Einfluss der Effizienzsteigerung äußerst gering.

6.4.2 Ergebnis des Best-Case Szenario

In diesem Fall sind laut den Untersuchungen ein Energieaufwand von rund 340 TWh sowie ein Ausstoß von ca. 93 Mio. t CO₂ zu erwarten. Dies ist eine deutliche Reduktion sowohl zum heutigen Stand als auch zu den Entwicklungen im Trendszenario. Die Untersuchungen zeigen, dass nur die Kombination von verschiedenen Maßnahme zum Ziel führen kann.

Ein gesteigertes Umweltbewusstsein und die damit einhergehende Erhöhung des Besetzungsgrades bzw. die Veränderung des Modal Splits wirken sich positiv auf die Bilanz aus. Die Kombination aus einem gestiegenen erneuerbaren Energieanteil, der Veränderung des Modal Splits, der Effizienzsteigerung und der Nutzung anderer Antriebsarten führt zu einem deutlichen Energieaufwand- und CO₂-Emissionsrückgang. Was die wichtigen Stellschrauben sind konnte im Rahmen dieses Szenarios nicht ermittelt werden.

6.4.3 Ergebnis des Politisches Szenario

Ein iteratives Herangehen ermöglicht ein langsames Annähern an die Zielwerte. Außerdem werden durch diese Sensitivitätsanalyse wichtige Zusammenhänge und Hebelwirkungen ersichtlich.

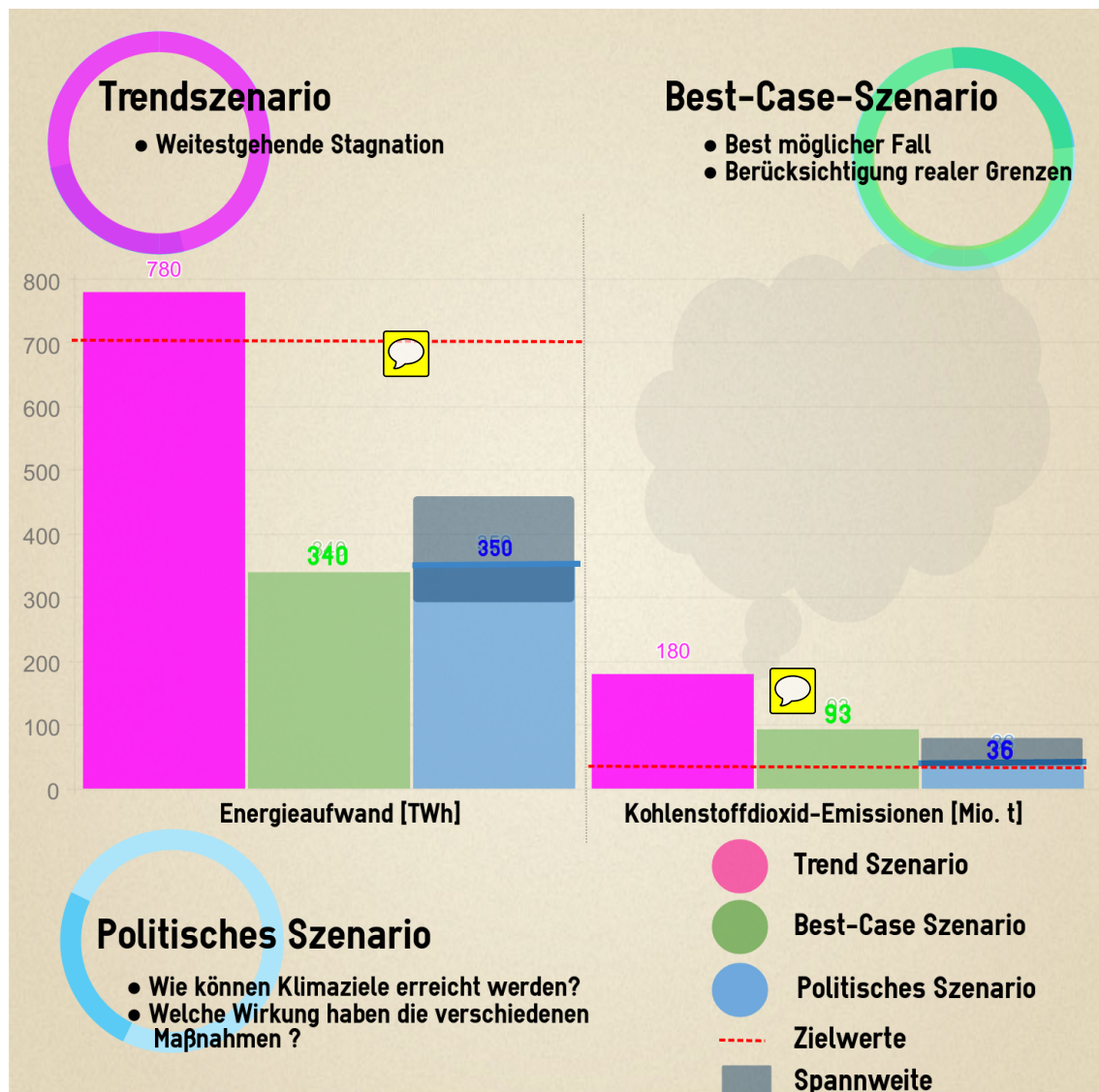


Abbildung 6.3: Übersicht Szenarien [eigene Darstellung]

Exemplarisch für das Vorgehen werden in Tabelle 6.4 drei Möglichkeiten, hier als Unterszenarien bezeichnet, vorgestellt. Die zahlreichen Veränderungen haben enorme Auswirkungen auf den Energieaufwand und die CO₂-Emissionen. Im Vergleich zum heutigen Stand sinken diese stark, was dem Ziel der Bundesregierung entspricht.

Im Vergleich zu der zu erwartenden Entwicklung (siehe Trend 6.3.1) sind enorme Reduktionen notwendig. Es zeigt sich, dass der Güterverkehr und insbesondere der Verkehrsträger Luft eine wichtige Stellschraube zur Emissionsreduktion ist. Die Emissionen von Flugzeugen müssen zum Erreichen der Klimaziele um mindestens 60 % sinken. Allerdings sind hier auch die Grenzen des verwendeten Modells zu hinterfragen (siehe 6.4.4). Ein steigender Elektrofahrzeuganteil im MIV führt zu geringeren Emissionen. Jedoch ist der Einfluss insgesamt geringer als die Fokus-

sierung der Bundesregierung auf diese Thema vermuten lässt.

Weiterhin können bereits durch leichte Veränderungen des Modal Splits große Wirkungen erzielt werden. Insbesondere die Reduktion des Straßenverkehrs ist zielführend. Diese Entwicklungen sind relativ unabhängig von der Bevölkerungsanzahl, Reiseweite und Transportweite zu erwarten.

Insgesamt kann die gewünschte Reduktion des Energieaufwands auf ca. 503 TWh relativ schnell und einfach erreicht werden. Komplizierter ist eine maximale Emission von 33 Mio. t CO₂. Die Untersuchungen zeigen, dass auch bei starken Veränderungen der zu erwartende Wert in einem Korridor von rund 36 und 59 Mio . t CO₂ liegt.

Parameter	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Bevölkerung	74 Mio.	74 Mio.	78 Mio.
Wege/Tag	+ 0,6 % p.a.	+ 0,6 % p.a.	+ 0,1 % p.a.
Tonnen/Tag	+ 1,3 % p.a.	+ 1,3 % p.a.	+ 0,1 % p.a.
Wirkungsgrad	jeweils +20 % (Ausnahme Schienenverkehr, als obere Grenze 95 %)	jeweils +30 % (Ausnahme Schienenverkehr, als obere Grenze 95 %)	jeweils +20 % (Ausnahme Schienenverkehr, als obere Grenze 95 %)
Reiseweite	jeweils +5 %	jeweils +5 %	±0
Transportweite	jeweils +10 %	jeweils +10 %	±0
Besetzungsgrad	jeweils +10 %	jeweils +10 %	±0
Strommix: Gas	20 %	10 %	keine Veränderungen
Kohle	0 %	5 %	
Kernenergie	20 %	5 %	
Erneuerbare	60 %	80 %	
Stromanteil: MIV	33 %	80 %	keine Veränderungen
ÖPNV	50 %	50 %	
Schiene	je 90 %	je 90 %	
Aufteilung MIV: Benzin	17 %	5 %	keine Veränderungen
Diesel	17 %	5 %	
Plug-In Hybrid	33 %	10 %	
Elektro	33 %	80 %	
Emissionen	jeweils -20 %	jeweils - 30 % (Ausnahme Güterluftverkehr, Reduktion um 60 %)	jeweils -20 % (Ausnahme Güterluftverkehr, Reduktion um 60 %)
Modal Split	Personenverkehr		
Bus	10 %	5 %	15 %
MIV	10 %	10 %	20 %
Schiene	25 %	35 %	16,9 %
ÖPNV	20 %	10 %	19 %
Luft	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Modal Split	Güterverkehr		
Straße	20 %	10 %	52,1 %
Schiene	69,6 %	79,6 %	39,4 %
Wasser	10 %	10 %	6 %
Luft	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Ergebnis			
Energieaufwand [TWh]	279,9	351,4	443,5
CO ₂ -Emissionen [Mio. t]	59,8	36,2	47,9

Tabelle 6.4: Beispiele für Eingangsparameter des politischen Szenarios

6.4.4 Grenzen des verwendeten Modells

Das entwickelte Programm ist eine sinnvolle Arbeitshilfe. Eine Trenderkennung ist in jedem Fall möglich. Jedoch hat die Arbeit mit dem Formular auch Grenzen des Modells aufgezeigt.

Um mit dem Modell arbeiten zu können müssen alle Werte vorhanden sein. Die Werte, welche nicht durch die Recherche ermittelt werden konnten, wurden approximiert. Aus diesem Grund können Ungenauigkeiten, welche aber vernachlässigt werden können, auftreten.

Durch die Arbeit mit dem Formular zeigt sich, dass die gewünschte Energieaufwandsreduktion schnell erreicht werden kann. Die Minderung der Emissionen hingegen ist nur langsam und schwer möglich. Tendenziell entspricht dies den realen Zusammenhängen, allerdings ist fraglich, ob sich die Entwicklung der beiden Werte so stark unterscheidet. Es ist anzunehmen, dass die Zusammenhänge etwas verzerrt, zu Gunsten des Energieaufwands, abgebildet werden.

Weiterhin ist anzumerken, dass das Vorgehen zur Untersuchung der ersten beiden Szenarien nicht optimal ist. Die Untersuchungen zum politischen Szenario haben die höchste Aussagekraft.

7 Diskussion der These

Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende?

Der Verkehrssektor kann einen großen Betrag zum Gelingen der Energiewende in Deutschland leisten. Allerdings hat die Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass das Potenzial der einzelnen Verkehrsträger stark schwankt.

Die Veränderung bzw. Reduktion des Straßenverkehrs senkt die CO₂-Emission erheblich. Eine wichtige Stellschraube ist der motorisierte Individualverkehr. Jedoch ist zu betonen, dass die Erhöhung des Elektrofahrzeuganteils eine weit geringere Wirkung als eine Senkung des Modal Split Anteils hat. Die Bundesregierung sollte neben der Erhöhung des Elektroautobestands eine allgemeine Bewusstseinsbildung anstreben. Eine Veränderung des Modal Splits sowie eine Erhöhung des Besetzungsgrads können dadurch erreicht werden. Diese Veränderung des Modal Splits ist auch für den Güterverkehr enorm wichtig, da im Betrachtungszeitraum nicht zu erwarten ist, dass sich die elektrischen Antriebsmöglichkeiten durchsetzen können.

Die Untersuchungen bestätigen, dass der Schienenverkehr als einer der Hauptakteure zum Gelingen der Energiewende zu verstehen ist. Dieser Verkehrsträger kann Strom aus erneuerbaren Energien schnell und unkompliziert nutzen. Es ist fraglich wie die nötige, starke Steigerung des Anteils am Modal Split erreicht werden kann. Im Güterverkehrsbereich könnte die Verlagerung insbesondere durch den Ausbau des Kombinierten Verkehrs unterstützt werden. Weiterhin ist eine nutzerfreundliche Anpassung der Rahmenbedingungen im Personenverkehr notwendig.

Der Verkehr auf dem Wasser ist sehr effizient und hat bereits heute einen relativ kleinen Einfluss auf Energie und CO₂-Emission. Langfristig könnte der Verkehrsträger Wasser auf Biodiesel umstellen und so seine Emissionen reduzieren. Weiterhin sind die Wachstumsmöglichkeiten auf Grund der strukturellen Gegebenheiten begrenzt. Insgesamt ist der Einfluss auf die Energiewende vergleichsweise gering.

Der Luftverkehr ist für die Energiewende problematisch. Die Untersuchungen zeigen, dass der Luftverkehr, bedingt durch die hohen Emissionswerte, einen großen Einfluss ausübt. Allerdings ist nicht zu erwarten, dass die erneuerbaren Energien eine Alternative sind. Lediglich der Umstieg auf alternative Kraftstoffe ist denkbar. Aus diesem Grund sind entweder eine Verkehrsvermeidung oder die starke Reduktion der Emissionswerte anzustreben.

Für alle Verkehrsträger gilt, dass die Kombination von verschiedenen Maßnahmen sinnvoll ist. Aus diesem Grund sollte insbesondere der kombinierte Verkehr ausgebaut werden. Problematisch ist, dass die Energiewende sich vorrangig auf den Ausbau der erneuerbaren Energien, also Strom, fokussiert. Aber nicht alle Verkehrsträger werden diesen nutzen können. Insgesamt sollte die Bundesregierung die nachhaltige Entwicklung des Verkehrssektors aktiv unterstützen. Weiterhin zeigt sich, dass bereits eine moderate Veränderung des Modal Splits zur Emissionsminderung führt. Auch die Wirkung von der Verwendung alternativer Kraftstoffe, der Emissi-

onsreduktion im Luftverkehr, der Verlagerung des Straßenverkehrs, der Erhöhung des Anteils des Schienenverkehrs und einer allgemeinen Bewusstseinsbildung ist groß. Der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung ist, innerhalb eines bestimmten Korridors, zu vernachlässigen.

Problematisch sind die großen Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Best-Case und des politischen Szenarios. Daraus lässt sich schließen, dass die Ziele, unter Annahme von realistischen Rahmenbedingungen, nicht erreicht werden können. Jedoch sind, wie bereits erläutert, die Grenzen des Modells zu bedenken. Nichts desto trotz muss die Entwicklung aller Parameter positiver verlaufen als anzunehmen ist, um die klimapolitischen Ziele erreichen zu können.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Ziele der Bundesregierung im Verkehrssektor schwer zu erreichen sind. Die Untersuchungen zeigen, dass enorme Veränderungen nötig sind, um die gesteckten Ziele erreichen zu können. Es ist fraglich, ob dies realisiert werden kann. Eine Verkehrswende unterstützt, in dem zu Beginn definierten Sinne (siehe 2), die Energiewende in jedem Fall.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die These „Keine Energiewende ohne eine Verkehrswende“ untersucht.

Zu Beginn werden einige der verwendeten Bezeichnungen erläutert. Insbesondere ist die Definition der Begriffe „Energiewende“ und „Verkehrswende“ wichtig für das weitere Verständnis. Im ersten Kapitel werden, basierend auf einer Literaturrecherche, die verschiedenen Möglichkeiten der Energieerzeugung dargestellt. Neben den fossilen Energiequellen, den regenerativen Energien und der Kernenergie werden auch die alternative Antriebsarten im Verkehrssektor vorgestellt.

Im folgenden Kapitel werden die aktuellen Energieverbräuche und die CO₂-Emissionen in Europa vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung des Verkehrssektors. Tendenziell lässt sich erkennen, dass die Elektrifizierung, der Anteil an Erneuerbaren Energien bzw. alternativen Kraftstoffen und die Effizienz im Verkehrssektor in Zukunft zunehmen werden.

Im nächsten Kapitel wird die Umwelt- und Verkehrspolitik der EU und Deutschlands der letzten 5 Jahre vorgestellt. Es sind drei Kernziele zu benennen: die Senkung der Treibhausgasemissionen, die Reduktion des Energieverbrauchs und die Erhöhung des Anteils der regenerativen Energien. Sowohl die Europäische Kommission als auch die Bundesregierung haben entsprechende Ziele formuliert. Auf Grundlage der zusammengestellten Informationen werden Handlungsfelder abgeleitet, welche sich im folgenden Kapitel widerspiegeln.

Anschließend wurde ein Formular mit Hilfe von VBA programmiert, welches eine Sensitivitätsanalyse ermöglicht. Untersucht wurden drei verschiedene Szenarien im Jahr 2050. Das erste Szenario zeigt den zu erwartenden Trend, falls die Entwicklung weiter geht wie bisher. Der zweite Fall simuliert den besten Fall unter Berücksichtigung der zu erwartenden Grenzen. Das letzte Szenario untersucht wie die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung erreicht werden können. Ergebnisse zeigen, dass die Ziele der Bundesregierung nur durch die aktive Förderung verschiedener Maßnahmen erreicht werden können. Falls die Gegebenheiten beim momentanen Stand stagnieren, werden der Energieaufwand und die CO₂-Emission weiter steigen. Gefördert werden sollten insbesondere die Verwendung alternativer Kraftstoffe, die Emissionsreduktion im Luftverkehr, die Reduktion des Straßenverkehrs, die Erhöhung des Anteils des Schienenverkehrs und eine allgemeine Bewusstseinsbildung. Der Einfluss der genauen Entwicklung der Bevölkerung, der Reise- und Transportweite ist, innerhalb eines bestimmten Korridors, marginal. Die Größenordnungen des Energieaufwands und der Emission sind abhängig von den technischen Rahmenbedingungen.

Abschließend zeigt die Diskussion, dass der Verkehrssektor einen großen Anteil am Gelingen der Energiewende haben kann. Allerdings ist zu bezweifeln ob die Ziele der Bundesregierung erreicht werden können, da starke Veränderungen nötig sind. Nur durch die Kombination verschiedener Maßnahmen und einer aktiven Zielverfolgung sind die gewünschte Reduktionen des Energieaufwands und der CO₂-Emissionen möglich.

Es bieten sich weitere Untersuchungen an. Die Infrastruktur wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Jedoch hat sich immer wieder gezeigt, dass eine Untersuchung des Einflusses der Infrastruktur ebenfalls interessant wäre.

Die Arbeit hat nachgewiesen, dass die Verkehrs- und Umweltpolitik ständigen Änderungen unterliegen. Deshalb wäre eine erneute Untersuchung des Standes bzw. der Entwicklungen nach einem bestimmten Zeitraum, beispielsweise in 5 Jahren, interessant. Allerdings hat das verwendete Formular einige Grenzen, welche erst während der Arbeit mit diesem entdeckt wurden. Aus diesem Grund wäre es sinnvoll das Modell weiter zu verfeinern.

Literaturverzeichnis

2009/28/EG (2009), ‘Europäisches Parlament’, Richtlinie 2009/28/EG.

406/2009/EG (2009), ‘Europäisches Parlament’, Entscheidung Nr. 406/2009/EG.

Adlunger, K., Lange, M. & Schmied, M. (2013), ‘Treibhausgasneutraler Verkehr im Jahr 2050’, *Internationales Verkehrswesen* .

AGEB (2016), ‘Bilanz 2014-AG Energiebilanz e. V.’.

URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html>

Agentur für erneuerbare Energien (2016), ‘Stromix in Deutschland im Jahr 2015’.

URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/strommix-in-deutschland-2015>

Allianz pro Schiene (2016), ‘Eisenbahnregulierungsgesetz beschlossen - Gefahr für den Fernverkehr?’.

URL: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/eisenbahnregulierungsgesetz-koennte-fernverkehr-schaden/>

Axthelm, W., Grothe, S., Hemke, S., Hoeft, M., Jensen, B., Lange, T., Lepinski, A. & Weitere (2015), ‘A bis Z. Fakten zur Windenergie’, *BWE Bundesverband WindEnergie e.V.* .

Bauernhansl, T. (2014), *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie - Analyse und Empfehlungen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

BDL (2015), ‘report 2015. Energieeffizienz und Klimaschutz’, *Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V.* .

Berlemann, M., Julia Freese, M.-A. L., Ragnitz, J. & Wesselhöft, J.-E. (2014), ‘Regionale Wirtschaftsentwicklung in Ostdeutschland und Sachsen bis 2030: Ergebnisse einer Projektionsrechnung’, *ifo Dresden berichtet* 21 (05) .

Bern (2016), ‘FAZ: Die Forderungen des „Club of Rome“’.

URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/neuer-bericht-die-forderungen-des-club-of-rome-14433541.html>

Bernau, P. (2016), ‘FAZ: Mehr Kinder? „Fasch und dumm“’.

URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/club-of-rome-fordert-grenzen-fuers-wirtschaftswachstum-14433381.html>

BMVBS (2013), *Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS)*, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

BMVI (2015), *Aktionplan Güterverkehr und Logistik*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

BMVI (2016a), ‘Bundeskabinet beschließt Entwurf eines neuen Eisenbahnregulierungsgesetzes’.

URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/_/2016/006-dobrindt-eisenbahnregulierungsgesetz.html

BMVI (2016b), *Bundesverkehrswegeplan 2030*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMVI (2016c), ‘Kombinierter Verkehr’.

URL: http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/GueterverkehrUndLogistik/Kombiniert-verkehr_node.html

BMWI (2016a), ‘Die nächste Phase der Energiewende kann beginnen!’.

URL: <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiewende/gesamtstrategie.html>

BMWI (2016b), ‘Eeg 2017 beschlossen - start in die naechste phase der energiewende’.

URL: https://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/_eeg-2017-wettbewerbliche-verguetung.htm

BMWI & BMU (2010), *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

California Environmental Protection Agency (2015), ‘Zero Emission Vehicle (ZEV) Program’.

URL: <https://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm>

Deutsche Bahn BDEW (2015), ‘40 Prozent Erneuerbare Energien im Bahnstrom’.

URL: https://www.deutschebahn.com/file/de/2191748/CU2NBKAbeUfp2L_L8wrnalN1voU/9080226/data/bilanzgrafik.pdf

Deutsches CleanTech Insitut (2012), ‘Geothermie. Licht ins Dunkel bringen - Wie Sie von Geothermie profitieren’, *CleanTech Studienreihe* .

EEG (2014), ‘Gesetz’, Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014.

EEG (2016), ‘Erneuerbare-Energien-Gesetz’, Gesetzesbeschluss des Bundestages- Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weitere Änderungen des Rechts der erneubaren Energien.

europa.eu (2015), ‘EU-Mitgliedsländer’.

URL: http://europa.eu/about-eu/countries/index_de.htm

Europäische Kommission (2011a), *Energiefahrplan 2050*.

Europäische Kommission (2011b), ‘Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen co₂-armen Wirtschaft bis 2050’.

- Europäische Kommission (2011c), 'Weißbuch', Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem.
- Europäische Kommission (2013), *Das Emissionshandelssystem der EU (EU ETS)*.
- Europäische Kommission (2014a), *Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten. Das 7. UAO – ein allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020*.
- Europäische Kommission (2014b), 'Verkehr', *Die europäische Union erklärt*.
- Europäische Kommission (2015), 'EU Klima- und Energiepaket, 2009'.
URL: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/eu_klima_und_energiepaket_2009_1526.htm
- Europäische Kommission (2016), 'Co2-arme Wirtschaft bis 2050'.
URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/index_de.htm
- eurostat (2015a), 'Bevölkerungsstruktur und Bevölkerungsalterung'.
URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Population_structure_and_ageing/de
- eurostat (2015b), 'Statistiken zur Bevölkerung und zum Bevölkerungswachstum'.
URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Population_and_population_change_statistics/de
- eurostat (2016), 'Energieverbrauch'.
URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy/de
- Fichert, F. & Grandjot, H.-H. (2016), 'Akteure, Ziele und Instrumente in der Verkehrspolitik', *Handbuch Verkehrspolitik* pp. 137–163.
- Gabler (2016), 'Modal Split - gabler Wirtschaftslexikon'.
URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/modal-split.html#definition>
- GG (1949), 'Grundgesetz', Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland.
- Günther, D. (2016), 'Nationaler Inventarbericht Deutschland - 2016', *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention*.
- Günther, M. (2014), *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien - Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*, 2015. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Gochermann, G. (2016), *Expedition Energiewende*, 1. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Hecht, M. (2011), 'Energieeffizienz und Treibhausgasemission des Verkehrs im Hinblick auf den Schienenverkehr', *Technische Universität Berlin*.

- Hohenberger, T. & Mühlenhoff, J. (2014), 'Energiewende im Verkehr - Potenziale für erneuerbare Mobilität', *Renews Spezial*.
- ifeu, I. (2012), *Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1990-2030" (TREMOD)*, 5.3 edn, ifeu, Heidelberg.
- Joos, F. (2015), *Energiewende - Quo vadis? - Beiträge zur Energieversorgung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W. & Wiese, A. (2013), *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*, 5. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Kleinknecht, K. (2015), *Risiko Energiewende - Wege aus der Sackgasse*, 1. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Kofler, M. (1996), *VBA-Programmierung mit Excel 7*, 1. Auflage edn, Addison-Wesley, Bonn.
- Konstantin, P. (2013), *Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*, 3. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Kreyenberg, D. (2016), *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität*, Springer.
- KWKG (2016), 'Kwkg', Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.
- Malberg, H. (2002), *Meteorologie und Klimatologie : eine Einführung*, 4. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2015), 'Bilanz zur Energiewende 2015', Brochure.
- Scheffler, J. (2014), *Die gesetzliche Basis und Förderinstrumente der Energiewende - Aktueller Stand des EEG und des KWKG*, 1. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Schubert, M., Kluth, T., Nebauer, G., Ratzenberger, R., Intraplan Consult GmbH & BVUBeratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH (2014), *Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Zusammenfassung*, los 3 edn, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.
- Schwister, K. (2010), *Taschenbuch der Umwelttechnik*, 2. Auflage edn, Hanser, München.
- Stan, C. (2015), *Alternative Antriebe für Automobile*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

statista.com (2016), ‘Anzahl der gemeldeten Pkw in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2016’.

URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12131/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland/>

Statistisches Bundesamt (2006), *Bevölkerung Deutschland bis 2050 - 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*, DeStatis.

Statistisches Bundesamt (2015), *Bevölkerung Deutschland bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*, DeStatis.

Sterner, M. & Stadler, I. (2014), *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, 1. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Umweltbundesamt (2014), ‘Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union’.

URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union>

Umweltbundesamt (2015a), ‘Daten zur Umwelt 2015’, *AGEB AG Energiebilanz e.V.* .

Umweltbundesamt (2015b), ‘Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen’.

URL: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch_energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren

Umweltbundesamt (2015c), ‘Europäischer Vergleich der Treibhausgas-Emissionen’.

URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/europaeischer-vergleich-der-treibhausgas-emissionen>

Unger, J. & Hurtado, A. (2014), *Alternative Energietechnik*, 5. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

VDR (2015), ‘Jahrebericht 2014’, *Jahresbericht des Präsidiums* .

VDV (2014), ‘Statistik 2014’, *VDV-Statistik* .

VDV (2016), ‘Schienengüterverkehr und Eisenbahninfrastruktur’.

URL: <https://www.vdv.de/statistik-gueterverkehr.aspx>

Voigt, U. & Hopf, R. (2013), *Verkehr, Energieverbrauch, Nachhaltigkeit*, 2. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, W. (2014), ‘Binnenschiff und Umwelt’.

URL: http://www.wsv.de/Schifffahrt/Binnenschiff_und_Umwelt/

Wietschel, W., Ullrich, U., Markewitz, M., Schulte, S., Genoese, G., Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F. & Genoese, F. (2015), *Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*, 1. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Wissenschaftliche Beirat beim Bundesministerium für Verkehr, B. u. S. (2013), ‘Weißbuch der Europäischen Kommission KOM(2011) 144- Stimmt der Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum sowie einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem?’, *Zeitschrift für Verkehrswissenschaften* pp. 4–23.

WSV (2014), ‘Förderung von Umschlaganlagen des Kombinierten Verkehrs’.

URL: https://www.elwis.de/Foerderprogramme/kombi_verkehr/index.html

WSV (2015a), ‘Innovativer Schiffbau sichert wettbewerbsfähige Arbeitsplätze’.

URL: <https://www.elwis.de/Foerderprogramme/Innovationsfoerderung/index.html>

WSV (2015b), ‘Zuwendungen für Vorhaben zur nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen’.

URL: <https://www.elwis.de/Foerderprogramme/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen/index.html>

www.die-klimaschutz-baustelle.de (2016), ‘www.die-klimaschutz-baustelle.de’.

URL: http://www.die-klimaschutz-baustelle.de/global_warming_quotes_mobility.html

Zahoransky, R., Allelein, H.-J., Bollin, E., Rimmeler, M., Schelling, U. & Schwarz, H. (2015), *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*, 7. Auflage edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Ziesing, H.-J., Görden, R., Maaßen, U., Nickel, M. & andere (2012), ‘Energie in Zahlen’, *AGEB AG Energiebilanz e.V.* .

Anhang

Abgabe des Formular auf dem beiliegenden Speichermedium

Endenergieverbrauch 2014* nach Sektoren und Energieträgern

Endenergieverbrauch	Industrie	Haushalte	GHD	Verkehr	Gesamt	Gesamt Anteile
Stein- und Braunkohlen	114 TWh	6 TWh	0 TWh	0 TWh	120 TWh	5,0 %
Mineralöl-produkte	21 TWh	144 TWh	79 TWh	684 TWh	928 TWh	38,6 %
Gase	239 TWh	218 TWh	104 TWh	2 TWh	563 TWh	23,4 %
Strom (inkl. Erneuerbare Energien)	224 TWh	130 TWh	143 TWh	12 TWh	509 TWh	21,2 %
Fernwärme	52 TWh	42 TWh	15 TWh	0 TWh	108 TWh	4,5 %
Erneuerbare Wärme	30 TWh	75 TWh	20 TWh	32 TWh	157 TWh	6,6 %
Sonst. Energieträger	17 TWh	0 TWh	0 TWh	0 TWh	17 TWh	0,7 %
Summe	697 TWh	615 TWh	361 TWh	730 TWh	2.402 TWh	100,0 %

* Vorläufige Angaben

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2014, Stand 08/2015

Anhang

1

Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014 Natürliche Einheiten Quelle: http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html Stand: 11.05.2016	Zeile	Steinkohlen				Braunkohlen				Mineralöle
		1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	
		Kohle	Briketts	Koks	Andere Stein- kohlen- produkte	Kohle	Briketts	Andere Braun- kohlen- produkte	Hart- braun- kohle	Erdöl (roh)
Gewinnung im Inland	1	7 640	-	-	-	178 155	-	-	-	2 439
Einfuhr	2	53 740	103	3 520	-	-	-	74	13	89 397
Bestandsentnahmen	3	-	-	-	-	-	-	10	-	-
Energieaufkommen im Inland	4	61 380	103	3 520	-	178 155	-	84	13	91 836
Ausfuhr	5	208	1	491	-	1 171	424	1 094	-	30
Hochseebunkerungen	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bestandsaufstockungen	7	139	-	71	-	64	4	-	-	536
PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IM INLAND	8	61 033	102	2 958	-	176 920	- 428	- 1 010	13	91 270
Kokereien	9	11 249	-	-	-	563	-	-	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	10	-	-	-	-	13 552	-	-	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	11	38 970	-	-	-	155 768	58	263	5	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	12	320	-	-	-	2 443	105	234	-	-
Kernkraftwerke	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	15	3 649	-	-	-	3 511	15	168	8	-
Fernheizwerke	16	474	-	-	-	186	-	66	-	-
Hochöfen	17	-	-	5 708	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	18	-	-	-	-	-	-	-	-	91 270
Sonstige Energieerzeuger	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Umwandlungseinsatz insgesamt	20	54 662	-	5 708	-	176 023	179	731	13	91 270
Kokereien	21	-	-	8 770	-	-	-	175	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	22	-	-	-	-	-	1 709	4 999	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kernkraftwerke	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fernheizwerke	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hochöfen	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Energieerzeuger	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Umwandlungsausstoß insgesamt	32	-	-	8 770	-	-	1 709	5 174	-	-
Kokereien	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohlenzechen, -brikettfabriken	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Braunkohlengruben, -brikettfabriken	35	-	-	-	-	893	10	2	-	-
Kraftwerke	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdöl- und Erdgasgewinnung	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Energieerzeuger	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	40	-	-	-	-	893	10	2	-	-
Fackel- u. Leitungsverluste	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENERGIEANGEBOT IM INL. N. UMWANDLUNGSBILANZ	42	6 371	102	6 020	-	4	1 092	3 431	-	-
NICHTENERGETISCHER VERBRAUCH	43	30	-	83	-	22	-	568	-	-
Statistische Differenzen	44	697	-	- 1 950	-	564	- 12	- 235	-	-
ENDENERGIEVERBRAUCH	45	7 038	102	3 987	-	546	1 080	2 628	-	-
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	46	2	-	2	-	-	-	118	-	-
Ernährung und Tabak	47	108	-	24	-	130	142	42	-	-
Papiergewerbe	48	261	-	-	-	-	204	114	-	-
Grundstoffchemie	49	374	-	-	-	152	-	159	-	-
Sonstige chemische Industrie	50	49	-	1	-	264	-	5	-	-
Gummi- u. Kunststoffwaren	51	-	-	-	-	-	-	19	-	-
Glas u. Keramik	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verarbeitung v. Steine u. Erden	53	461	-	100	-	-	-	1 911	-	-
Metallerzeugung	54	5 503	-	3 497	-	-	-	254	-	-
NE-Metalle, -gießereien	55	27	-	291	-	-	-	3	-	-
Metallbearbeitung	56	1	-	9	-	-	-	-	-	-
Maschinenbau	57	-	-	4	-	-	-	1	-	-
Fahrzeugbau	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Wirtschaftszweige	59	8	-	5	-	-	-	2	-	-
Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe insg.	60	6 795	-	3 933	-	546	346	2 628	-	-
Straßenverkehr	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Straßenverkehr	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luftverkehr	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Küsten- und Binnenschifffahrt	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verkehr insgesamt	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Haushalte	66	177	102	43	-	-	734	-	-	-
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher	67	66	-	11	-	-	-	-	-	-
Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	68	243	102	54	-	-	734	-	-	-

Anhang

2

Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014 Natürliche Einheiten Quelle: http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html Stand: 11.05.2016	Zeile	1000 t									
		Otto- kraft stoffe	Roh- benzin	Flugtur- binenkt.	Diesel- kraft- stoff	Heizöl leicht	Heizöl schwer	Petrol- koks	Flüssig- gas	Raffine- riegas	
Gewinnung im Inland	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Einfuhr	2	1 803	7 801	4 812	12 714	4 157	2 485	864	672	-	-
Bestandsentnahmen	3	285	-	-	-	479	-	24	-	72	-
Energieaufkommen im Inland	4	2 088	7 801	4 812	12 714	4 636	2 485	888	672	72	-
Ausfuhr	5	4 821	611	892	6 136	1 558	3 142	795	276	-	-
Hochseebunkeringen	6	-	-	-	490	-	1 866	-	-	-	-
Bestandsaufstockungen	7	-	230	196	115	-	82	-	61	-	-
PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IM INLAND	8	-2 733	6 960	3 724	5 973	3 078	-2 605	93	335	72	-
Kokereien	9	-	-	-	-	-	-	831	2	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	11	-	-	-	1	153	177	5	-	-	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	12	-	-	-	-	46	485	19	80	199	-
Kernkraftwerke	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	14	-	-	-	-	35	-	-	-	-	-
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	15	-	-	-	-	41	19	5	-	-	-
Fernheizwerke	16	-	-	-	-	49	-	-	-	-	-
Hochöfen	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	18	1 207	122	3	-	985	813	-	64	89	-
Sonstige Energieerzeuger	19	-	5 961	-	-	-	-	-	-	-	-
Umwandlungseinsatz insgesamt	20	1 207	6 083	3	1	1 309	1 494	860	146	288	-
Kokereien	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kernkraftwerke	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fernheizwerke	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hochöfen	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	30	16 820	9 830	4 805	27 306	14 536	8 049	1 764	2 521	3 646	-
Sonstige Energieerzeuger	31	4 437	398	-	-	109	277	-	34	269	-
Umwandlungsausstoß insgesamt	32	21 257	10 228	4 805	27 306	14 645	8 326	1 764	2 555	3 915	-
Kokereien	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohlenzechen, -brikettfabriken	34	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Braunkohlengruben, -brikettfabriken	35	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
Kraftwerke	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdöl- und Erdgasgewinnung	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	38	-	-	-	2	12	447	572	18	3 310	-
Sonstige Energieerzeuger	39	-	-	-	-	23	51	-	2	-	-
Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	40	-	-	-	3	37	498	572	20	3 310	-
Fackel- u. Leitungsverluste	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENERGIEANGEBOT IM INL. N. UMWANDLUNGSBILANZ	42	17 317	11 105	8 526	33 275	16 377	3 729	425	2 724	389	-
NICHTENERGETISCHER VERBRAUCH	43	-	11 105	-	-	514	3 370	278	1 097	389	-
Statistische Differenzen	44	-	-	-	-	35	-	-	-	-	-
ENDENERGIEVERBRAUCH	45	17 317	-	8 526	33 275	15 898	359	147	1 627	-	-
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	46	-	-	-	1	13	2	7	3	-	-
Ernährung und Tabak	47	-	-	-	-	168	17	-	6	-	-
Papiergewerbe	48	-	-	-	-	20	8	-	2	-	-
Grundstoffchemie	49	-	-	-	-	13	121	-	236	-	-
Sonstige chemische Industrie	50	-	-	-	-	44	109	7	1	-	-
Gummi- u. Kunststoffwaren	51	-	-	-	-	59	2	-	4	-	-
Glas u. Keramik	52	-	-	-	-	7	54	-	2	-	-
Verarbeitung v. Steine u. Erden	53	-	-	-	3	70	13	122	8	-	-
Metallerzeugung	54	-	-	-	-	10	2	-	-	-	-
NE-Metalle, -gießereien	55	-	-	-	-	19	24	11	2	-	-
Metallbearbeitung	56	-	-	-	-	84	-	-	20	-	-
Maschinenbau	57	-	-	-	6	135	1	-	11	-	-
Fahrzeugbau	58	-	-	-	1	36	-	-	3	-	-
Sonstige Wirtschaftszweige	59	-	-	-	1	108	6	-	12	-	-
Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe insg.	60	-	-	-	12	786	359	147	310	-	-
Straßenverkehr	61	-	-	-	288	-	-	-	-	-	-
Luftverkehr	62	17 102	-	-	30 407	-	-	-	467	-	-
Küsten- und Binnenschifffahrt	63	11	-	8 455	-	-	-	-	-	-	-
Verkehr insgesamt	64	-	-	-	284	-	-	-	-	-	-
Haushalte	65	17 113	-	8 455	30 979	-	-	-	467	-	-
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher	66	91	-	-	-	10 958	-	-	460	-	-
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	113	-	71	2 284	4 154	-	-	390	-	-
Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	68	204	-	71	2 284	15 112	-	-	850	-	-

Anhang

3

Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014 Natürliche Einheiten Quelle: http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html Stand: 11.05.2016	Zeile	Gase					Erneuerbare Energien		
		1000 t	Mio. m³	Mio. m³	Mio. kWh	Mio. m³	TJ	TJ	TJ
		Andere Mineral- ölpro- dukte	Kokerei- u. Stadt- gas	Gichtgas u. Konvert- tergas	Naturgase Erdgas Erdölgas	Gruben- gas	Wasser-, Windkraft u. Photovol- taikanlagen	Biomasse und erneuer- bare Abfälle	Sonstige erneuerb. Energie- träger
Gewinnung im Inland	1	-	-	-	83 288	645	406 802	1 068 925	68 421
Einfuhr	2	1 732	-	-	878 557	-	-	46 290	-
Bestandsentnahmen	3	263	-	-	-	-	-	-	-
Energieaufkommen im Inland	4	1 995	-	-	961 845	645	406 802	1 115 215	68 421
Ausfuhr	5	3 004	-	-	217 686	-	-	71 899	-
Hochseebunkereien	6	1	-	-	-	-	-	-	-
Bestandsaufstockungen	7	-	-	-	5 209	-	-	-	-
PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IM INLAND	8	-1 010	-	-	738 950	645	406 802	1 043 316	68 421
Kokereien	9	-	-	-	-	-	-	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	11	24	222	5 074	56 619	113	-	124 691	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	12	269	873	11 576	40 901	161	-	39 513	-
Kernkraftwerke	13	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	14	-	-	-	10 496	201	406 802	242 501	3 533
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	15	2	1	32	28 319	48	-	54 545	-
Fernheizwerke	16	58	48	39	23 475	85	-	34 992	620
Hochöfen	17	-	-	-	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	18	3 338	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Energieerzeuger	19	494	-	-	-	-	-	-	-
Umwandlungsseinsatz insgesamt	20	4 185	1 144	16 721	159 810	608	406 802	496 242	4 153
Kokereien	21	-	4 546	-	-	-	-	-	-
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	22	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärme- und Kälteanlagen	23	-	-	-	-	-	-	-	-
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	24	-	-	-	-	-	-	-	-
Kernkraftwerke	25	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	26	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	27	-	-	-	-	-	-	-	-
Fernheizwerke	28	-	-	-	-	-	-	-	-
Hochöfen	29	-	-	42 259	-	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	30	7 534	-	-	-	-	-	-	-
Sonstige Energieerzeuger	31	1 474	-	-	-	-	-	-	-
Umwandlungsausstoß insgesamt	32	9 008	4 546	42 259	-	-	-	-	-
Kokereien	33	-	455	4 235	7	-	-	-	-
Steinkohlengruben, -brikettfabriken	34	-	-	-	-	3	-	387	-
Braunkohlengruben, -brikettfabriken	35	-	-	-	-	-	-	13	-
Kraftwerke	36	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdöl- und Erdgasgewinnung	37	-	-	-	2 390	-	-	-	-
Mineralölverarbeitung	38	122	85	-	12 458	-	-	450	-
Sonstige Energieerzeuger	39	70	-	-	4 422	-	-	19 692	-
Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	40	192	540	4 235	19 277	3	-	20 542	-
Fackel- u. Leitungsverluste	41	-	-	5 478	99	30	-	907	-
ENERGIEANGEBOT IM INL. N. UMWANDLUNGSBILANZ	42	3 621	2 862	15 825	559 764	4	-	525 625	64 268
NICHTENERGETISCHER VERBRAUCH	43	3 476	-	-	32 307	-	-	-	-
Statistische Differenzen	44	-	-678	-	16 011	-	-	-1 078	-
ENDENERGIEVERBRAUCH	45	145	2 184	15 825	543 468	4	-	524 547	64 268
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	46	1	-	-	1 214	-	-	134	-
Ernährung und Tabak	47	-	-	-	31 058	-	-	5 166	-
Papiergewerbe	48	1	-	-	22 564	-	-	28 142	-
Grundstoffchemie	49	-	193	-	49 252	-	-	1 563	-
Sonstige chemische Industrie	50	-	-	-	9 395	-	-	1 005	-
Gummi- u. Kunststoffwaren	51	-	-	-	5 882	-	-	498	-
Glas u. Keramik	52	-	-	-	17 519	-	-	847	-
Verarbeitung v. Steinen u. Erden	53	141	-	-	11 557	-	-	17 561	-
Metallerzeugung	54	-	1 845	15 825	17 798	4	-	187	-
NE-Metalle, -gießereien	55	-	-	-	10 274	-	-	14	-
Metallbearbeitung	56	-	40	-	12 564	-	-	1 114	-
Maschinenbau	57	-	-	-	6 093	-	-	460	-
Fahrzeugbau	58	-	104	-	9 513	-	-	262	-
Sonstige Wirtschaftszweige	59	1	1	-	11 895	-	-	56 800	-
Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe insg.	60	144	2 184	15 825	216 577	4	-	113 753	-
Straßenverkehr	61	-	-	-	-	-	-	836	-
Luftverkehr	62	-	-	-	2 076	-	-	115 828	-
Küsten- und Binnenschifffahrt	63	-	-	-	-	-	-	-	-
Verkehr insgesamt	64	-	-	-	-	-	-	-	-
Haushalte	65	-	-	-	2 076	-	-	116 664	-
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher	66	-	-	-	216 877	-	-	210 126	58 424
Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	67	1	-	-	107 939	-	-	84 004	5 844
	68	1	-	-	324 816	-	-	294 130	64 268

Anhang

4

Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014 Natürliche Einheiten Quelle: http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html Stand: 11.05.2016	Zeile	Sonstige Energieträger	Elektrischer Strom und andere Energieträger			Energieträger insgesamt		
		TJ	Mio.kWh	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ
		Nichterneuer- bare Abfälle, Abwärme	Strom	Kern- energie	Fern- wärme	Primär- energie- träger	Sekundär- energie- träger	Summe
Gewinnung im Inland	1	225 923	-	-	-	4 032 514	-	4 032 514
Einfuhr	2	-	40 435	1 059 583	-	9 521 395	1 824 621	11 346 016
Bestandsentnahmen	3	-	-	-	-	-	47 419	47 419
Energieaufkommen im Inland	4	225 923	40 435	1 059 583	-	13 553 909	1 872 041	15 425 950
Ausfuhr	5	-	74 322	-	141	875 527	1 198 689	2 074 216
Hochseebunkeringen	6	-	-	-	-	-	94 681	94 681
Bestandsaufstockungen	7	-	-	-	-	45 918	31 548	77 466
PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IM INLAND	8	225 923	-33 887	1 059 583	- 141	12 632 465	547 122	13 179 587
Kokereien	9	-	-	-	-	331 914	26 151	358 065
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	10	-	-	-	-	137 038	-	137 038
Wärme- und Kälteanlagen	11	75 462	-	-	-	2 831 826	46 187	2 878 014
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	12	12 900	-	-	-	236 709	113 626	350 335
Kernkraftwerke	13	-	-	1 059 583	-	1 059 583	-	1 059 583
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	14	-	8 003	-	-	694 213	30 324	724 537
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	15	37 864	-	-	-	323 450	6 684	330 134
Fernheizwerke	16	20 314	-	-	-	157 402	6 791	164 192
Hochöfen	17	-	-	-	-	-	164 042	164 042
Mineralölverarbeitung	18	-	-	-	-	3 881 169	271 301	4 152 470
Sonstige Energieerzeuger	19	-	-	-	-	-	281 866	281 866
Umwandlungsseinsatz insgesamt	20	146 539	8 003	1 059 583	-	9 653 304	946 972	10 600 276
Kokereien	21	-	-	-	-	-	329 967	329 967
Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	22	-	-	-	-	-	143 169	143 169
Wärme- und Kälteanlagen	23	-	326 408	-	-	-	1 175 069	1 175 069
Industriewärme- und Kälteanlagen (nur für Strom)	24	-	45 446	-	-	-	163 606	163 606
Kernkraftwerke	25	-	97 129	-	-	-	349 664	349 664
Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen	26	-	158 808	-	-	-	571 709	571 709
Heizkraftwerke der allg. Versorgung	27	-	-	-	318 432	-	318 432	318 432
Fernheizwerke	28	-	-	-	119 908	-	119 908	119 908
Hochöfen	29	-	-	-	-	-	176 938	176 938
Mineralölverarbeitung	30	-	-	-	-	-	4 100 558	4 100 558
Sonstige Energieerzeuger	31	-	-	-	-	-	297 747	297 747
Umwandlungsausstoß insgesamt	32	-	627 791	-	438 340	-	7 746 766	7 746 766
Kokereien	33	-	300	-	-	24	26 088	26 113
Steinkohlenzechen, -brikettfabriken	34	-	1 034	-	169	442	3 955	4 397
Braunkohlengruben, -brikettfabriken	35	-	4 877	-	5 644	9 452	23 507	32 959
Kraftwerke	36	-	35 836	-	-	-	129 010	129 010
Erdöl- und Erdgasgewinnung	37	-	619	-	28	8 605	2 274	10 879
Mineralölverarbeitung	38	6 489	6 239	-	5 612	51 787	212 210	263 997
Sonstige Energieerzeuger	39	-	-	-	-	35 610	5 848	41 458
Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	40	6 489	48 905	-	11 453	105 920	402 892	508 812
Fackel- u. Leitungsverluste	41	-	24 159	-	43 650	1 744	153 559	155 303
ENERGIEANGEBOT IM INL.N.UMWANDLUNGSBILANZ	42	72 896	512 837	-	383 096	2 871 496	6 790 465	9 661 962
NICHTENERGETISCHER VERBRAUCH	43	-	-	-	-	117 344	872 335	989 678
Statistische Differenzen	44	-	-	-	-	100 315	-73 798	26 518
ENDENERGIEVERBRAUCH	45	72 896	512 837	-	383 096	2 854 468	5 844 333	8 698 801
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	46	-	1 768	-	51	4 556	10 164	14 719
Ernährung und Tabak	47	8	18 074	-	10 334	121 527	87 949	209 477
Papiergewerbe	48	2 875	19 516	-	28 456	119 515	106 484	225 999
Grundstoffchemie	49	34 973	46 432	-	75 306	225 474	265 267	490 741
Sonstige chemische Industrie	50	601	7 055	-	19 436	39 701	51 403	91 103
Gummi- u. Kunststoffwaren	51	67	13 988	-	4 442	21 744	57 974	79 719
Glas u. Keramik	52	525	4 787	-	228	64 441	19 987	84 427
Verarbeitung v. Steine u. Erden	53	33 514	7 334	-	442	105 272	85 529	190 801
Metallerzeugung	54	-	20 301	-	1 704	251 974	277 121	529 095
NE-Metalle, -gießereien	55	268	17 384	-	596	38 146	73 840	111 986
Metallbearbeitung	56	38	17 958	-	1 487	46 402	71 563	117 965
Maschinenbau	57	-	11 391	-	3 618	22 395	51 353	73 748
Fahrzeugbau	58	1	18 536	-	15 653	34 519	85 770	120 289
Sonstige Wirtschaftszweige	59	24	24 251	-	12 454	99 868	105 452	205 320
Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe insg.	60	72 896	228 772	-	174 206	1 195 534	1 349 856	2 545 390
Straßenverkehr	61	-	11 469	-	-	836	53 571	54 407
Luftverkehr	62	-	119	-	-	123 300	2 063 382	2 186 681
Küsten- und Binnenschifffahrt	63	-	-	-	-	-	362 340	362 340
Verkehr insgesamt	64	-	11 588	-	-	124 136	2 491 405	2 615 541
Haushalte	66	-	129 700	-	153 342	1 054 564	1 133 476	2 188 041
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher	67	-	142 777	-	55 548	480 234	869 596	1 349 830
Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	68	-	272 477	-	208 890	1 534 798	2 003 072	3 537 870

Modell zur Berechnung von Energieaufwand und Emissionen

Energieaufwand [TWh]	Emissionen [Mio. t]	Personenverkehrsleistung [Mrd. P]	Güterverkehrsleistung [Mrd. tkm]
761,3805754	155,2017248	1010	547,48832 Heute
780,1575063	180,2923866	1133,441797	866,288126 Trend
340,114974	93,51908472	1146,312445	1323,8189 Best-Case
279,8656166	59,75618897	1042,323945	1323,8189 A
351,3916711	36,18887976	740,7577538	1851,622624 B
443,5449508	47,88169053	1388,329501	823,9116939 C

	Allgemeines						Energieaufwand											
	Verkehrsaufkommen gesamt	Emissionen gesamt	Energieaufwand gesamt	Bevölkerung	Wege pro Tag	Transportierte Tonnen pro Tag						Güterverkehr - Straße	Güterverkehr - Schiene	Güterverkehr - Wasser	Güterverkehr - Luft			
							MIV	ÖPNV	Schiene	Luft	Fernbus							
Heute	1557,168	155,2017	761,3806	81280500	3,4	11500000	6,2E+11	1,09E+10	6,81E+08	7,13E+08	5,42E+10	1,26E+09	1,37E+10	2,52E+10	3,52E+10			
Trend	1999,73	180,2924	780,1575	74000000	4	16583000	6,08E+11	1,1E+10	7,25E+08	7,01E+08	5,33E+10	1,82E+09	2,05E+10	3,5E+10	4,88E+10			
Best-Case	2470,131	93,51908	340,115	74000000	4	16583000	4,02E+10	1,17E+10	1,2E+09	5,44E+08	1,05E+11	1,11E+09	8,54E+10	5,18E+10	4,34E+10			
A	2470,131	90,88956	344,0534	74000000	4	16583000	4,41E+10	1,17E+10	1,2E+09	5,44E+08	1,05E+11	1,11E+09	8,54E+10	5,18E+10	4,34E+10			
B	2592,38	36,18888	351,3917	74000000	4	16583000	5,62E+10	5,85E+09	2,79E+09	3,76E+08	4,84E+10	2,22E+08	1,72E+11	3,59E+10	3E+10			
C	2212,241	47,88169	443,545	78000000	3,524	11891000	1,92E+11	1,91E+10	1,55E+09	5,52E+08	1,26E+11	8,28E+08	5,54E+10	2,03E+10	2,83E+10			

	CO2-Emissionen										MIV spez. durchschnittliche Primärenergieaufwand spez. CO2-Emission		
	MIV	ÖPNV	Schiene	Luft	Fernbus	Güterverkehr - Straße	Güterverkehr - Schiene	Güterverkehr - Wasser	Güterverkehr - Luft	Anteil am Modal Split	Reiseweite	nd	Emission
Heute	8,42E+13	5,37E+11	3,82E+09	1,55523E+11	2E+12	1,18E+11	3,04E+10	8,35E+11	6,77E+13	0,5	14,7	0,54	135,89631
Trend	8,27E+13	5,4E+11	4,07E+09	1,5292E+11	2E+12	1,7E+11	4,56E+10	1,16E+12	9,39E+13	0,5	15,4	0,54	135,89631
Best-Case	1,24E+12	5,23E+11	4,37E+10	1,18502E+11	3E+12	1,04E+11	3,1E+12	1,72E+12	8,35E+13	0,2	15,4	0,1337	30,846
A	1,51E+12	5,75E+11	6,72E+09	1,18502E+11	3E+12	1,04E+11	1,9E+11	1,72E+12	8,35E+13	0,2	15,4	0,14681	34,1586
B	6,01E+12	2,02E+11	6,08E+10	65856151368	1E+12	1,66E+10	3,69E+12	9,5E+11	2,4E+13	0,1	15,4	0,54	107,0679
C	2,07E+13	7,5E+11	6,97E+09	96579740048	3E+12	6,19E+10	9,87E+10	5,37E+11	2,26E+13	0,2	14,7	0,54	107,91

	ÖPNV spez.				Personenschienenverkehr spez.				Personenluftverkehr spez.				Fernbus spez.			
	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]
Heute	0,09	21,3	0,3	49,14	0,069	34	0,26	5,612	0,001	468	0,83	218,005	0,05	300	0,162	30,3
Trend	0,09	22	0,3	49,14	0,069	35,7	0,26	5,612	0,001	491	0,83	218,005	0,05	315	0,162	30,3
Best-Case	0,15	22	0,3	44,724	0,15	35,7	0,26	36,4756	0,001	491	0,83	218,005	0,15	315	0,162	30,3
A	0,15	22	0,3	49,14	0,15	35,7	0,26	5,612	0,001	491	0,83	218,005	0,15	315	0,162	30,3
B	0,1	22	0,3	34,55	0,35	35,7	0,26	21,7785	0,001	491	0,83	175	0,1	315	0,162	24
C	0,19	21,3	0,3	39,2	0,169	34	0,26	4,485	0,001	468	0,83	175	0,15	300	0,162	24

	Güterverkehr - Straße spez.				Güterverkehr - Schiene spez.				Güterverkehr - Wasser spez.				Güterverkehr - Luft spez.			
	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]	Anteil am Modal Split	durchschn ittliche Reiseweit e	Primärene rgieaufwa nd [kWh/km]	spez. CO2- Emission [g/km]
Heute	0,821	104	0,36598	93,5	0,094	302	0,102	2,226	0,06	271	0,12921	33,13	0,001	400	7,33	1924,76
Trend	0,821	114	0,36598	93,5	0,094	332	0,102	2,226	0,06	298	0,12921	33,13	0,001	440	7,33	1924,76
Best-Case	0,5	114	0,36598	93,5	0,396	332	0,102	36,3063	0,1	298	0,12921	33,13	0,001	440	7,33	1924,76
A	0,5	114	0,36598	93,5	0,396	332	0,102	2,226	0,1	298	0,12921	33,13	0,001	440	7,33	1924,76
B	0,1	114	0,36598	74,8	0,796	332	0,102	21,508	0,1	298	0,12921	26,5	0,001	440	7,33	800
C	0,521	104	0,36598	74,8	0,394	302	0,102	1,78	0,06	271	0,12921	26,5	0,001	400	7,33	800

Berechnungsformular

Die eingetragenen Werte sind lediglich als Vorschlag zu verstehen und sind beliebig anzupassen.

Bevölkerung: 81280500 | Anzahl Wege/Tag: 3,4 | spez. CO₂-Emission: 11500000

Personenverkehr		Güterverkehr			
Modal Split	Reiseweite	Wirkungsgrad	spez. Primärenergieaufwand [kWh/km]	spez. CO ₂ -Emission [g/km]	
Fernbus	0,05	300	0,35	0,28	30,3
MTV	0,5	14,7	0,35	0,3	137,2
Schiene	0,065	34	0,89	0,33	56,1
ÖPNV	0,09	21,3	0,5	0,23	70,2
Luft	0,001	468	0,35	0,68	218,0
					Berechnen
					Abbruch

MTV - Kraftstoffmix anpassen?

Stromanteil der Verkehrsträger anpassen?

Herstellung des Strommixes anpassen?

CO₂-Emission [g/km]

Anteil am Strommix

ja ☐ nein ☒

Erddgas 0,15 25

Kohle 0,45 300

Kernenergie 0,15 12

Erneuerbare Energie 0,24 7

Anteil am Kraftstoffverbrauch

ja ☐ nein ☒

Benzin 0,4

Diesel 0,2

Strom 0,2

Plug-in Hybrid 0,2

Primärenergieaufwand [kWh/km]

CO₂-Emission [g/km]

58,84

49,46

19,22

28,5

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen der Masterarbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Weimar, den 01.11.2016

Leonore Gölfert